

Zuverlässigkeit als Gestaltungsparameter betriebswirtschaftlicher Systeme

INAUGURAL · DISSERTATIO

zur

Erlangung der wirtschaftswissenschaftlichen

Doktorwürde

des

Fachbereichs Wirtschaftswissenschaften

der

Philipps-Universität zu Marburg

vorgelegt von

Wolfgang Schellmann

Diplomingenieur aus Leslau

Marburg 1973

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41553805_0080

Zuverlässigkeit als Gestaltungsparameter betriebswirtschaftlicher Systeme

INAUGURAL - DISSERTATION
zur
Erlangung der wirtschaftswissenschaftlichen
Doktorwürde
des
Fachbereichs Wirtschaftswissenschaften
der
Philipps-Universität zu Marburg

vorgelegt von
Wolfgang Schellmann
Diplomingenieur aus Leslau

Marburg 1973



Als Dissertation vom Fachbereich
Wirtschaftswissenschaften
angenommen am 27.6.1973

Berichterstatter: Prof. Dr. Eberhard Dülfer
Mitberichterstatter: Prof. Dr. Wolfgang Förster

Tag der mündlichen Prüfung: 3.7.1973

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
2.	Systemtheoretischer Ansatz	5
2.1.	Systemqualität	6
2.2.	Systemzuverlässigkeit	10
2.3.	Behandlung der Zuverlässigkeit in der Literatur	15
3.	Mathematische Behandlung der Systemzuver- lässigkeit	18
3.1.	Ausfalldichte und Zuverlässigkeitsfunk- tion	19
3.2.	Ausfallrate und mittlere Lebensdauer . .	21
3.3.	Spezielle Verteilungsfunktionen	23
3.3.1.	Exponentialverteilung	23
3.3.2.	Normalverteilung	26
3.3.3.	WEIBULL-Verteilung	28
3.4.	Zuverlässigkeit von Systemen	29
3.4.1.	Logische Reihenschaltung	30
3.4.2.	Logische Parallelschaltung	33
3.4.2.1.	Heiße Redundanz	34
3.4.2.2.	Kalte Redundanz	37
3.4.2.3.	Gleitende Redundanz	40
3.4.3.	Vermaschte Schaltungen	43
3.4.4.	Sicherheitsanalyse	45
4.	Zuverlässigkeitseigenschaften der System- elemente	47
4.1.	Systemausfälle durch technische Elemente	47
4.2.	Systemausfälle durch menschliches Fehl- verhalten	50

4.2.1.	Totalausfälle des Menschen . . .	55
4.2.2.	Der Irrtum als spezifisch menschliche Ausfallart	60
4.2.3.	Einflußparameter menschlicher Systemzuverlässigkeit.	63
4.2.4.	Quantitative Größenordnung menschlicher Zuverlässigkeit . .	71
4.3.	Prinzipien für die Verteilung der Sub- funktionen eines Systems auf Mensch und Maschine	72
5.	Zuverlässigkeitserhöhende Methoden und ihre Ertragsgesetze	78
5.1.	Zuverlässigkeit durch Redundanzen . . .	78
5.2.	Zuverlässigkeit durch Änderung des Reservierungsmaßstabes	87
5.3.	Zuverlässigkeit durch Verringerung der Zahl der aktiven Elemente	88
5.4.	Zuverlässigkeit durch Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Elemente	90
5.5.	Zuverlässigkeit durch Unterlastung . . .	95
5.6.	Zuverlässigkeit durch vorbeugende In- standhaltung	99
5.7.	Zuverlässigkeit durch Einwirkung auf die Psychologie	104
5.8.	Produktionstheoretische Anmerkungen . .	107
6.	Ansätze zur Bildung eines Entscheidungsmodells für die Festlegung wirtschaftlich sinnvoller Systemzuverlässigkeiten	110
6.1.	Wertanalyse und organisatorische Voraus- setzungen	110
6.2.	Kostenverlauf als Entscheidungskriterium	113
6.3.	Algorithmus zur Bestimmung der kostenop- timalen Gestaltung eines redundanten Systems	117
7.	Literaturverzeichnis	127

1. Einleitung

Die während der letzten drei Jahrzehnte in Angriff genommene Entwicklung und Inbetriebnahme hochkomplizierter, technischer Anlagen stellte die Ingenieure vor teilweise völlig unerwartete Probleme. So sah man sich mit der stets wiederkehrenden Erscheinung konfrontiert, daß die aus zahllosen Einzelelementen aufgebauten Anlagen prinzipiell für den vorgesehenen Verwendungszweck geeignet waren, im praktischen Betrieb aber ihre Aufgabe nicht verwirklichen konnten, weil ständig ein für die planmäßige Funktion notwendiges Element in fehlerhaftem Zustand war.

Zum ersten Mal wurde dieser Zusammenhang während des zweiten Weltkriegs bei der Entwicklung des für die damaligen Verhältnisse sehr komplexen Waffensystems V₁ erkannt.¹⁾ Die praktische Erprobung dieser Rakete war zunächst gekennzeichnet durch lauter Fehlschläge infolge fehlerhafter Einzelteile, obwohl an die verwendeten Bauelemente nach damaliger Anschauung hohe Qualitätsmaßstäbe angelegt worden waren. Ähnliche Erfahrungen konnten beim Betrieb der ersten mit 17.000 Elektronenröhren bestückten EDV-Anlage ENIAC gemacht werden. Die Ausfallwahrscheinlichkeit der hier verwendeten Röhren gewährleistete Funkgeräten zwar eine hohe Lebensdauer, die DVA arbeitete jedoch oft nur wenige Minuten planmäßig, und ihre gesamte fehlerfreie Rechenzeit betrug nur 45 % der totalen Betriebszeit.

An den in der Folgezeit entwickelten noch erheblich komplexeren, militärischen Vorhaben, wie dem erdumspannenden Raketenfrühwarnsystem oder den "Minuteman" und "Polaris"-

1) BAZOVSKY, I., Reliability Theory and Practice, Englewood Cliffs, N.J. 1962 (zit. "Reliability"), S.275

Programmen für den Abschluß atomarer Sprengköpfe wurde noch deutlicher, daß ein komplexes Projekt insgesamt sinnlos werden und zugleich katastrophale Folgen auslösen kann, sofern es nicht gleichzeitig gelingt, die Ausfallwahrscheinlichkeit auf ein extrem niedriges Maß zu reduzieren.

Im Rahmen der systematischen Analyse dieser Zusammenhänge wurde eine mathematische Theorie der Zuverlässigkeit formuliert. Diese Theorie gestattet die quantitative Erfassung des Ausfallverhaltens und aus ihrer Anwendung folgen detaillierte Prinzipien, wie man eine Anlage im einzelnen zu gestalten hat, damit sie den an sie gestellten Zuverlässigkeitsanforderungen genügt.

Dem Betriebswirt ist die Erscheinung, daß ein System prinzipiell für seinen Verwendungszweck geeignet ist, im praktischen Betrieb aber häufig versagt, vertraut. Bei einigen hiermit eng verwandten Problemkreisen, wie Ersatzteilbevorratung, betrieblichem Kontrollwesen, Produktqualität als Teil des absatzpolitischen Instrumentariums, Fragen der Anlagenreparatur und -wartung, ja im Grunde der gesamten betrieblichen Sicherheitspolitik, handelt es sich sogar um vieldiskutierte Themen. Angesichts dieses Interesses ist es bemerkenswert, daß Denkansatz und Erkenntnisse der Zuverlässigkeitstheorie von der Betriebswirtschaftslehre noch nicht aufgegriffen worden sind. Bisher wurden nur insoweit einige ihrer betriebswirtschaftlichen Aspekte behandelt, als sie im unmittelbaren Interessenbereich der Ingenieure lagen. So richtete sich das Augenmerk vorwiegend auf Fragen, die in direktem Zusammenhang mit den bei Reparatur, Stillstand und Wartung unzuverlässiger Anlagen auftretenden Kosten stehen, da diese im Zuge wachsender Mechanisierung und Automatisierung gegenüber der reinen Investition eine

immer entscheidendere Rolle spielten.²⁾ Darüberhinaus übertrug man Erkenntnisse aus der Zuverlässigkeitstheorie auf industrielle Erzeugnisse und studierte ihren Einfluß auf den Absatz.³⁾

Abgesehen davon, daß die bisher veröffentlichten Beiträge in keiner Weise die aufgegriffenen Themenkreise im Sinne einer gründlichen betriebswirtschaftlichen Analyse befriedigend behandeln, scheint die Zuverlässigkeitstheorie außerdem für die Betriebswirtschaftslehre von sehr viel grundsätzlicherer Bedeutung zu sein, als dies bisher erkannt wurde. So läßt sich zeigen, daß der systemtheoretische Ansatz der Zuverlässigkeitstheorie über die üblichen terminologischen Vorteile hinaus konkrete Gestaltungsaussagen quantitativer Art liefern kann, daß er für so verschiedenartige betriebswirtschaftliche Fragestellungen wie Gestaltung der Unternehmungsorganisation, Produktgestaltung, Lagerhaltung und Ersatzteilbevorratung, Kapitalreservenbildung, Personalpolitik, Wartungszyklen, Pausenregelung u.ä. gemeinsame Berührungsflächen aufzeigt, auf deren wirtschaftliche Optimierung ein im Prinzip einheitlicher Methodenkatalog anzuwenden ist. Darüberhinaus können in einigen Fällen die Ertragsgesetze der zuverlässigkeitserhöhenden Methoden mathematisch geschlossen formuliert werden.

2) BAZOVSKY, I., Reliability, S.276

3) z.B. das "5 and 50 warranty program" des Automobilkonzerns CHRYSLER: Garantie für 5 Jahre oder 50.000 Meilen auf Motor und Getriebe, vgl. OSANN, F., Commercial Reliability - The CHRYSLER 5 and 50 warranty (zit. "Comm.Rel."), in: Proceedings 11th Nat. Symp. on Reliability and Quality Control, Miami Beach 1965

Obwohl es das Ziel der vorliegenden Arbeit ist, die Zuverlässigkeit quantitativ zu erfassen und als Gestaltungsparameter betriebswirtschaftlich relevanter Systeme heranzuziehen, wird dieses auf Grund fehlender Daten zunächst nicht immer vollständig gelingen. Aber selbst auf dieser Stufe ist die dargestellte Denkmethodik wenigstens geeignet, die Umstände transparent zu machen, die die Zuverlässigkeit eines Systems beeinflussen, wodurch der Blick für diejenigen Schwachstellen geschärft wird, an denen zuverlässigkeitserhöhende Methoden angesetzt werden müssen. Daß die quantitativen Schwierigkeiten schließlich gelöst werden können, beweist das Mondlandeunternehmen "Apollo", das ohne umfassende Erforschung der Zuverlässigkeit des zu seiner Verwirklichung erforderlichen äußerst komplexen Mensch-Maschine-Systems nicht realisierbar gewesen wäre.

2. Systemtheoretischer Ansatz

Als außerordentlich fruchtbarer Denkansatz für das Verständnis komplexer Sachverhalte hat sich das Denken in Systemen erwiesen. Der Systembegriff, der von konkreten Erscheinungen abstrahiert und die Wirklichkeit nur als zielgerichtetes Zusammenwirken einer Gesamtheit miteinander in Beziehung stehender Teile versteht, geht davon aus, daß den realen Objektbereichen isomorphe Strukturen zugrundeliegen, für die allgemeingültige Gesetzmäßigkeiten abgeleitet werden können. Wirtschaftlich relevantes Handeln im weitesten Sinne kann als die Herstellung von Beziehungen zwischen einzelnen Faktoren, d.h. als zielgerichtetes Gestalten von Systemen verstanden werden. Da die Wirtschaftswissenschaften die systemtheoretische Betrachtungsweise bisher im Grunde nur verbal anwenden können, liegt ihr Wert darin begründet, ein interdisziplinär verwendbares Konzept für Terminologie und Deskription der betriebswirtschaftlichen Objektbereiche zu besitzen. Ziel der Forschung ist es jedoch, über diese Vorstufen hinaus zu empirisch-kognitiv begründeten Hypothesen zu kommen, die schließlich als Basis zur Gewinnung praxeologischer Aussagen herangezogen werden können.⁴⁾ Hier vermag eine besondere Ausprägungsform der allgemeinen Systemtheorie, die mathematische Systemtheorie, einen Beitrag zu leisten.⁵⁾ Die vorliegende Arbeit baut auf einem solchen mathematisch-systemtheoretischen Konzept auf, indem sie unter Zuhilfenahme logischer Verknüpfungsglieder ein abstrakt-symbolisches Modell des zu klärenden Komplexes bildet, das dann im Hinblick auf ein Merkmal des Komplexes, die Systemzuverlässigkeit, in ein

4) vgl. GROCHLA, E., Unternehmensorganisation - Neue Ansätze und Konzeptionen, Hamburg 1972 (zit. "Unternehmensorg."), S. 21, 27

5) SCHIEMENZ, B., Die mathematische Systemtheorie als Hilfe bei der Bildung betriebswirtschaftlicher Modelle, ZfbF 40 (1970) (zit. "Mathematische Syst."), S. 769 ff

arithmetisches Äquivalent überführt werden kann. Dabei läßt sich zeigen, daß bei konsequenter Durchführung des mathematisch-systemtheoretischen Konzeptes Systemgesetzmäßigkeiten bis hin zu konkreten praxeologischen Aussagen abgeleitet werden können, ohne daß unrealistische Annahmen über das betrachtete System gemacht werden müßten. Die Ergebnisse sind von grundsätzlicher Gültigkeit und können daher in gleicher Weise innerhalb der Organisationstheorie wie bei der Produktgestaltung, also auf Mensch-Mensch-, Mensch-Maschine- und Maschine-Maschine-Systeme in allgemeiner Form angewendet werden.

Für die z.B. bei GROCHLA⁶⁾ ausgesprochene Vermutung, daß es durch die Anwendung der Systemtheorie leichter fallen dürfte, organisatorisch relevante Modelle in anderen Disziplinen aufzuspüren und in die Organisationstheorie zu integrieren, ist die Zuverlässigkeitstheorie ein überzeugendes Beispiel.

2.1. Systemqualität

Die Zielgerichtetheit wirtschaftlichen Gestaltungshandelns erfordert, daß als Prämisse ein exakt definierter Systemzweck⁷⁾ ohne konfliktäre Teilbereiche und Zweckantinomien gesetzt wird. Inwieweit ein konkretes System dann die Ziele verwirklicht, kann mit Hilfe des Begriffes "Qualität" beschrieben werden.

6) GROCHLA, E., Unternehmungsorg., S. 37; s. auch ULRICH, H., Die Unternehmung als produktives soziales System, 2. Aufl., Bern-Stuttgart 1970 (zit. "Unternehmung") S. 135

7) ULRICH, H., Unternehmung, S. 114 unterscheidet zwischen Zweck- und Zielorientierung: "Unter Zweck verstehen wir die Funktionen, welche ein System in seiner Umwelt ausübt bzw. ausüben soll, unter Ziel die vom System selbst angestrebten Verhaltensweisen oder Zustände irgendwelcher Outputgrößen."

In der betriebswirtschaftlichen Literatur erscheint dieser Begriff in ähnlichem Bedeutungszusammenhang bei der Behandlung des absatzpolitischen Instrumentariums⁸⁾ sowie als eine der drei Hauptkosteneinflussgrößen bei GUTENBERG.⁹⁾

Trotz dieser wichtigen Rolle ist das Qualitätsproblem vergleichsweise aber wenig behandelt worden.¹⁰⁾ Da der Qualitätsbegriff zudem nur als Erzeugniseigenschaft vor allem im Konsumgüterbereich beachtet wird¹¹⁾, wird die Definition immer wieder auf einen speziellen Bereich ausgerichtet, in dem das Verhältnis rationaler zu irrationalen Kriterien zunächst sehr undurchsichtig ist. Die Meinungen gehen daher auseinander, ob mehr subjektiv-irrationale¹²⁾

8) vgl. NIESCHLAG, R.-DICHTL, E.-HÖRSCHGEN, H., Marketing - Ein entscheidungstheoretischer Ansatz, 4. Aufl., Berlin 1971, S. 158 ff

9) s. GUTENBERG, E., Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, Bd. I, Die Produktion, 18. Aufl., Berlin-Heidelberg-New York 1971 (zit. "Prod."), S. 344 ff

10) Hinweise auf diesen Mangel finden sich z.B. bei ALBACH, H., Stand und Aufgabe der Betriebswirtschaftslehre heute, ZfbF 19 (1967), S. 459; STRAUCH, H., Dynamische Qualitätsverbesserung, Baden-Baden-Bad Homburg 1969 (zit. "Qualitätsverb"), S. 19 f

11) KELLEROWICZ, K., Betriebswirtschaftslehre der Industrie, Bd. II, 6. Aufl., Freiburg 1968, S. 471 ff; KAW-LATH, A., Theoretische Grundlagen der Qualitätspolitik, Wiesbaden 1969 (zit. "Qualitätspol."); NIESCHLAG-DICHTL-HÖRSCHGEN, Marketing, S. 158: hier jedoch verständig, da Problemstellung nur Absatz umfaßt.

12) MENDER, C., Grundsätze der Volkswirtschaftslehre, 2. Aufl., Wien-Leipzig 1923, S. 138, 142 ff; LISOWSKY, A., Qualität und Betrieb, Stuttgart 1928, S. 46 ff; RIEGER, H., Der Güterbegriff in der Theorie des Qualitätswettbewerbs, Berlin 1962, S. 79: "...im Grunde kann die gesamte Grenznutzenschule hierzu gezählt werden, da sie als Bewertungskriterium nur die subjektive Nutzenvorstellung gelten läßt."; CHMIELEWICZ, K., Grundlagen der industriellen Produktgestaltung, Berlin 1968 (zit. "Produktgest."), S. 38

oder mehr objektiv-teleologische¹³⁾ Kriterien das Wesen der Produktqualität ausmachen.

Die Ingenieursdisziplinen ordnen von vornherein nur kardinal meßbare, mindestens jedoch eindeutig in ordinaler Rangfolge angebbare Produkteigenschaften dem Begriff "Qualität" zu. Meistgebrauchte Definition ist dabei die folgende:

"Qualität eines Gutes ist diejenige Beschaffenheit, die es für seinen Verwendungszweck geeignet macht."¹⁴⁾

Diese Definition stellt zwar auch auf individuelle Zielvorstellungen ab, geht jedoch davon aus, daß die geforderten Eigenschaften, wenngleich subjektiv motiviert und damit nicht immer objektiv begründbar, sich grundsätzlich als quantitativer Standard formulieren lassen müssen, derart, daß der Grad der Verwirklichung des Standards sich in Form einer Sollwertabweichung

$$x = x_{\text{soll}} - x_{\text{ist}}$$

-
- 13) Demgegenüber vertritt WIRZ, W., Zur Logik des Qualitätsbegriffes, Jahrbuch für Nationalök. und Stat., Bd. 104, 1915, S.1 ff einen puristisch teleologischen Qualitätsbegriff; ähnlich KLATT, S., Die ökonomische Bedeutung der Qualität von Verkehrsleistungen, Berlin 1965; KAWLATH, A., Qualitätspol., S. 48 f
- 14) Definition der Deutschen Gesellschaft für Qualität (ASQ) gültig seit 1968; so auch STRAUCH, H., Qualitätsverb., S. 19; daneben wird häufig auch eine speziell verbraucherbezogene Def. verwendet: "Qualität eines Erzeugnisses ist der Grad seiner Eignung, den Ansprüchen der Verbraucher zu genügen." Def. des Bundesamtes für Wehrtechnik und Beschaffung (Vg 95082, Apr. 1959); anglo-amerikanische Literatur: "quality is fitness for use"; MASING, W., Qualität, QZ 15 (1970) 1, S. 21 f; LILIE, H. et al., Qualitätskontrolle-Qualitätssicherung, Berlin 1966 (zit. "Qualitätskontrolle"), S.25: "Die Qualität ist die Gesamtheit der Eigenschaften eines Erzeugnisses, die den Grad seiner Eignung für den vorgesehenen Verwendungszweck bestimmt." (Übers. der Def. des RGW-Instituts für Standardisierung, Moskau 1965)

oder als relativer Perfektionsgrad:

$$Q = 1 - \frac{x_{\text{soll}} - x_{\text{ist}}}{x_{\text{soll}}} = \frac{x_{\text{ist}}}{x_{\text{soll}}}$$

angeben läßt.¹⁵⁾

Im Sinne einer systemtheoretischen Denkweise ist die Beschränkung des Qualitätsbegriffes ausschließlich auf produzierte Güter jedoch zu eng. Er sollte allgemein zur Beschreibung derjenigen Systemeigenschaften, die für den Grad der Zielverwirklichung bestimmend sind, herangezogen werden. Allgemein könnte daher etwa wie folgt definiert werden:

Qualität eines Systems ist die jeweilige Ausprägung von Systemeigenschaften, die den Grad der Zielverwirklichung durch das System bestimmt.

Da ein derart festgelegtes Qualitätsverständnis auf Eigenschaftszustände abstellt, bezieht es sich nur auf Charakteristika, die sich bei Betrachtung des Systems unmittelbar nachweisen lassen. Die Kontrolle der Qualität eines Systems geschieht daher grundsätzlich in der Weise, daß gegenwärtig ermittelte Meß- und Prüfergebnisse mit vorgegebenen Standards verglichen werden. Obwohl bei der Qualitätskontrolle in großem Umfang statistische Methoden angewendet werden, handelt es sich im Kern nicht um ein notwendigerweise stochastisches Problem. Die Wahrscheinlichkeitsrechnung kommt nur deshalb zum Zuge, weil ein Prüfen der gesamten Population wirtschaftlich meist zu aufwendig ist, oder weil die angewendete Prüfungsmethode die Zerstörung des Systems zur Folge hat.

15) vgl. z.B. ENRICK, N.L., Qualitätskontrolle im Industriebetrieb, München 1961; STRAUCH, H., Qualitätsverb.; MASING, W., Qualität, S.22

2.2. Systemzuverlässigkeit

Zur vollständigen Beschreibung von Systemeigenschaften reicht die Betrachtung von Zuständen nicht aus, da durch sie zunächst nur der Grad der Zielverwirklichung zum Zeitpunkt der Zustandsermittlung bekannt ist. Systemeigenschaften ändern sich aber erfahrungsgemäß während der Aktionsdauer eines Systems. Im Hinblick auf den Systemzweck verschlechtern sie sich meist, wobei der Vorgang selbst durch Begriffe wie Verschleiß, Korrosion, Ermüdung, Alterung beschrieben wird. Die Systemeigenschaften können sich gelegentlich auch im Zeitablauf verbessern. So impliziert eine Systemalterung nicht grundsätzlich eine negative Entwicklung, wie bei lernenden Systemen deutlich wird. Der zeitliche Aspekt der Systemeigenschaften, d.h. das Verhalten der Systemqualität während der Aktivitätsdauer des Systems, ist Gegenstand der Zuverlässigkeitsforschung. Im Gegensatz zur üblichen Auffassung¹⁶⁾ ist es sinnvoll, den zeitlichen Aspekt nicht unter den Begriff "Qualität" zu subsumieren. Es handelt sich hier um ein systematisch anders einzuordnendes Charakteristikum mit eigenem theoretischen Unterbau und spezifischen Bestimmungsmethoden.¹⁷⁾

Da die Definition der Systemqualität die vorherige Abgrenzung des Systemzwecks als Bezugspunkt erfordert, muß bei der exakten Definition der Systemzuverlässigkeit ebenfalls auf die Verwirklichung dieses Zwecks abgestellt werden. Hierbei wird von einem am System beobachteten Ereignis ausgegangen, das erkennen läßt, daß das System nicht mehr die gestellten Forderungen erfüllt. Dieses Ereignis wird als Ausfall bezeichnet.

16) z.B. CHMIELEWICZ, K., Produktgest., S.153 f; KAW-LATH, A., Qualitätspol., S.68

17) vgl. GNEDENKO, B.W.-BELJAJEW, J.K.-SOLOWJEW, A.D., Mathematische Methoden der Zuverlässigkeitstheorie, Bd.I, Berlin 1968 (zit. "Zuverlässigkeitstheorie I"), S.62 f

Ein Ausfall ist demnach eine Veränderung von Systemeigenschaften, die im Sinne des Systemzwecks ein Versagen des Systems zur Folge hat.¹⁸⁾

Der Zeitpunkt, zu dem ein System ausfällt, ist nicht exakt bestimmbar. Selbst bei äußerst einfachen Systemen entziehen sich die inneren und äußeren Bestimmungsfaktoren für den genauen Ausfallzeitpunkt jeder deterministischen Ermittlung, da diese in ihrer konkreten Zahl nicht mehr überschaubar sind und im einzelnen bis in ihre atomare Struktur zurückverfolgt werden müßten. So ist bereits nicht mehr exakt bestimmbar, wie lange es dauert, bis eine einzelne Schraube unter Last zu Bruch geht. Umso aussichtsloser ist daher das Bemühen, den Ausfallzeitpunkt eines Systems höherer Ordnung exakt bestimmen zu wollen.

Eine Aussage über das zeitliche Verhalten der Systemqualität ist demnach grundsätzlich nur wahrscheinlichkeitstheoretisch möglich¹⁹⁾, d.h. das Ereignis "Nichteintritt

18) Definition ähnlich, jedoch weniger allgemein bei LEVIN, B.R.-USA KOV, I.A., Einige Aspekte des Zuverlässigkeitsproblems in der Gegenwart, TZ 3 (1967) 7, S.12: "Veränderungen des Zustandes einer Anlage, die zu einem Verlust dieser Fähigkeit führen, bezeichnet man als Ausfall"; MYERS, R.H., Reliability Definitions, in: MYERS-WONG-GORDY, Reliability Engineering for Electronic Systems, New York-London-Sydney 1964 (zit. "Rel.Engineering"), S. 329: "A failure is a detected cessation of ability to perform a specified function or functions within previously established limits on the area of interest."; GNEDENKO-BELJAJEW-SOLOWJEW, Zuverlässigkeitstheorie I, S.64: "Ein Ausfall ist ... teilweiser oder vollständiger Verlust bzw. Veränderung gewisser Eigenschaften des Systems, wodurch seine Arbeitsfähigkeit wesentlich nachläßt oder ganz verloren geht."; HUMMITSCH, P., Zuverlässigkeit von Systemen, Berlin 1965 (zit. "Zuverlässigkeit"), S.7: "(Ausfall ist eine, d. Verf.) ... durch Änderungen entstandene unzulässige Abweichung mindestens eines Merkmals eines zu Beanspruchungsbeginn fehlerfreien Elementes oder Systems".

19) vgl. BAZOVSKY, I., Reliability, S.12

eines Ausfalls" muß als eine stochastische Größe ex tunc angesehen werden. Die Ereigniswahrscheinlichkeit kann so für ein bestimmtes Zeitintervall angegeben werden. Für diese Wahrscheinlichkeit hat sich im Schrifttum der Begriff "Zuverlässigkeit" (reliability)²⁰⁾ durchgesetzt. Im Sinne einer Systemklassifizierung führt die Zuverlässigkeitstheorie demnach zu probabilistischen Modellen.²¹⁾

Obwohl die überwiegende Mehrzahl der veröffentlichten Definitionen auf den Kriterien "Ausfall" und dessen Ereigniswahrscheinlichkeit aufbauen, ist die Terminologie noch nicht einheitlich. Fast jede Veröffentlichung beginnt mit einer eigenen Zuverlässigkeitsdefinition, ohne auf die verschiedenen Ansichten hierüber eingegangen zu sein oder näher zu begründen, warum sie sich nicht einer bereits veröffentlichten anschließen will. Die Folge besonders im deutschen Schrifttum ist, daß annähernd so viele Definitionen existieren, wie es Veröffentlichungen zu diesem Thema gibt. Im wesentlichen konkurrieren zwei Hauptrichtungen miteinander. Die eine bezieht sich auf die im älteren amerikanischen Schrifttum (vor 1960) vorherrschende ingenieurmäßige Auffassung und formuliert Zuverlässigkeit etwa als "die Wahrscheinlichkeit, daß ein Gerät während einer definierten Zeitdauer unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt."²²⁾ Gegen diese Definition ist einzuwenden, daß sie durch

-
- 20) andere Bezeichnungen z.B. bei WILLRETT, H., Erhöhung der Zuverlässigkeit eines Systems durch Verdoppelung und Unterteilung, TZ 1 (1964) 2 (zit. "Erhöhung"), S. 44 ff: Überlebenswahrscheinlichkeit; SCHNITZLER, W.-SCHÜRGER, K.-SCHWEIZER, G., Die Verwirklichung von Flugregelungssystemen hoher Zuverlässigkeit ... (zit. "Flugregelungssyst."), verwenden Sicherheit, Zuverlässigkeit, Überlebenswahrscheinlichkeit synonym.
- 21) SCHIEMENZ, B., Die Anwendbarkeit der Regelungstheorie zur Gestaltung betrieblicher Entscheidungsprozesse, Diss. Darmstadt 1971 (zit. "Regelungstheorie"), S. 51 ff; ULRICH, H., Unternehmung, S. 117

Verwendung typisch technischer Termini dem Systemdenken zu wenig Rechnung trägt, und daß sie außerdem auch nur in Verbindung mit einer näheren Erläuterung des Begriffes "Ausfall" eindeutig ist. Wie bereits dargestellt, kann ein Ausfall nur identifiziert werden, wenn der Systemzweck bekannt ist. Erst hieraus können z.B. bestimmte zulässige Toleranzen für die Abweichungen der Signale abgeleitet werden. Man hat sich daher in den neueren Definitionen bemüht, den Begriff "Ausfall" zu umgehen und nur auf die "Nichterfüllung an das System gestellter Forderungen" abzustellen. So definiert etwa ZORGER: "Reliability is defined as the probability of performing a function under specified conditions ... for a specific period of time."²³⁾ Im Anschluß daran hat sich das maßgebliche

-
- 22) MESSERSCHMIDT-BÖLKOW-BLOHM (Hrsg.), Technische Zuverlässigkeit, Berlin-Heidelbg.-NewYork 1971 (zit. "Tech. Zuv."), S.2; ähnliche Definitionen bei SCHNITZLER-SCHÜRGER-SCHWEIZER, Flugregelungssyst., S.65: "... gibt die Wahrscheinlichkeit an, daß ein System, das bis zur Zeit t intakt ist, nicht in dem nächsten Zeitabschnitt Δt ausfällt."; ANGST, W.-WOHLER, V., Betriebssicherheit automatischer Steuerungssysteme, in: Berichtswerk der 5. INTERKAMA 1971, München-Wien 1972, S.379: "... versteht man die Wahrscheinlichkeit, daß (eine Anlage, d.Verf.) während einer bestimmten Zeit ... planmäßig arbeitet." MYERS, R.H., Reliability Definitions, S.334: "... the probability of performing without failure a specified function under given conditions for a specified period of time."; wenig präzise OPFERMANN, K., Kostenoptimale Zuverlässigkeit produktiver Systeme, Wiesbaden 1968 (zit. "Kostenoptimale Zuv."), S.21: "... den Grad der Ausfallanfälligkeit der Aggregate, Arbeitskräfte und Beschaffungseinrichtungen, also der potentiellen Störquellen, nennen wir ihre Zuverlässigkeit."
- 23) ZORGER, P.H., Reliability Estimation, in: IRESON, W.G. (ed.), Reliability Handbook, New York 1966 (zit. "Handbook"), S.5-3; BAZOVSKY, I., Reliability, S.11: "Reliability is the probability of a device performing its purpose adequately for the period of time intended under the operating conditions encountered."; LLOYD, D.K.-LIPOW, M., Reliability: Management, Methods, and Mathematics, Englewood Cliffs, N.J. 1962 (zit. "Reliability"), S.20: "... the probability of performance over a required period of time"; so auch BALL, L.W.-HILL, D.A., Introduction to Reliability Engineering (zit. "Introd."), in: MYERS-WONG-GORDY, Rel. Engineering, S.1

deutsche Schrifttum diesem Trend angepaßt. Die DIN-Norm 40041²⁴⁾ legt dementsprechend den Begriff folgendermaßen fest:

" Zuverlässigkeit ist die Fähigkeit einer Einheit, denjenigen durch den Verwendungszweck bedingten Anforderungen zu genügen, die an das Verhalten ihrer Eigenschaften während einer gegebenen Zeitdauer gestellt sind."

Diese Norm ist allerdings nicht befriedigend, weil in dieser allgemeinen Formulierung der Wahrscheinlichkeitscharakter der Zuverlässigkeit nicht mehr deutlich erkennbar ist. Das in diesem Zusammenhang von DOMBROWSKI angeführte Argument²⁵⁾, daß eine "... unmittelbare Zuordnung einer Wahrscheinlichkeit zum Begriff Zuverlässigkeit zumindest im deutschen Sprachgebrauch nicht möglich ist, da Zuverlässigkeit eine Eigenschaft ist, die nicht unmittelbar quantitativ faßbar ist" vermag nicht zu überzeugen, denn es ist jeder Definition prinzipiell freigestellt, vorhandenen Begriffen neue Inhalte zu geben oder Begriffe inhaltlich enger zu fassen. Im übrigen sollte im Falle der DIN-Norm die Chance genutzt werden, die Formulierung so zu wählen, daß ihre Anwendbarkeit auf Systeme allgemein klarer herausgestellt wird. Obwohl DIN-Normen im allgemeinen etwas dogmatisches anhaftet, kann ihr in dieser Arbeit nicht gefolgt werden. Für die vorliegende Abhandlung soll im Sinne der neueren anglo-amerikanischen Auffassungen definiert werden:

" Zuverlässigkeit ist die Wahrscheinlichkeit, daß ein System während einer gegebenen Zeitdauer den durch den

24) DIN 40041 (Vornorm): Zuverlässigkeit elektrischer Bauelemente - Begriffe, Okt.1967, S.2; s.a. DIN 40042 (Vornorm): Zuverlässigkeit elektrischer Geräte, Anlagen und Systeme, Juni 1970; diese Definition verwenden z.B. MESSERSCHMIDT-BÖLKOW-BLOHM, Tech.Zuv., S.3; DOMBROWSKI, E., Einführung in die Zuverlässigkeit elektronischer Geräte und Systeme, Berlin 1970 (zit. "Einführung"), S.17

25) DOMBROWSKI, E., Einführung, S.17

Systemzweck bedingten Anforderungen genügt."²⁶⁾

2.3. Behandlung der Zuverlässigkeit in der Literatur

In der überwiegenden Mehrzahl betonen die einschlägigen Publikationen den rein technischen oder abstrakt-mathematischen Aspekt des Zuverlässigkeitsproblems, während ihre Ausstrahlung auf andere Disziplinen bisher vergleichsweise gering ist. Zu nennen sind hier besonders die jährlich veröffentlichten "Proceedings of the Annual Symposium on Reliability"²⁷⁾, die den Stand der Forschung, soweit er aus Wettbewerbs- oder militärpolitischen Gründen überhaupt publiziert wird, widerspiegeln. Immer wieder zitiert werden die Standardwerke von BAZOVSKY²⁸⁾, BARLOW-PROSCHAN²⁹⁾, SANDLER³⁰⁾, IRESON³¹⁾ und besonders LLOYD-LIPOW³²⁾, der Managementproblemen einen breiteren Raum einräumt. Zu den wichtigsten Veröffentlichungen auf dem deutschen Markt gehören vor allem das eigenartigerweise nur selten zitierte Werk von GNEDENKO-BELJAJEW-SOLOWJEW³³⁾ sowie eine kleinere Schrift von HUMMITZSCH³⁴⁾, daneben

26) In der vorliegenden Arbeit werden die übrigen zuverlässigkeitsbezogenen Begriffe im Sinne der Definition in DIN 40041, DIN 40042 verwendet.

27) sponsored by IEEE, IES, ASNT, ASQC

28) BAZOVSKY, I., Reliability Theory and Practice, 2. Aufl., Englewood Cliffs, N.J. 1962

29) BARLOW, R.E.-PROSCHAN, F., Mathematical Theory of Reliability, New York-London-Sydney 1965

30) SANDLER, G.H., System Reliability Engineering, Englewood Cliffs, N.J. 1963 (zit. "System")

31) IRESON, W.G. (ed.), Reliability Handbook, New York 1966

32) LLOYD, D.K.-LIPOW, M., Reliability: Management, Methods, and Mathematics, Englewood Cliffs, N.J. 1962

33) GNEDENKO, B.W.-BELJAJEW, J.K.-SOLOWJEW, A.D., Mathematische Methoden der Zuverlässigkeitstheorie, Bd. I, II, Berlin 1968 (Übers. a.d. Russischen)

34) HUMMITZSCH, P., Zuverlässigkeit von Systemen, 2. Aufl., Berlin 1965

Monographien von DOMBROWSKI³⁵⁾, STÖRMER³⁶⁾, HOFMANN³⁷⁾, SMITH³⁸⁾, NARESKY, J.J.³⁹⁾. Für den Betriebswirt dürfte von besonderem Interesse "MESSERSCHMIDT-BÖLKOW-BLOHM⁴⁰⁾, Technische Zuverlässigkeit" sein, weil hier in relativ leicht fasslicher Form in die bisweilen recht schwierige Zuverlässigkeitsmathematik eingeführt wird, und in deutlicher Anlehnung an LLOYD-LIPOW an einigen Stellen Ansatzpunkte für betriebswirtschaftliche Forschung deutlich werden. Gründlichere Auseinandersetzungen mit der Zuverlässigkeitstheorie liegen im deutschen betriebswirtschaftlichen Schrifttum noch nicht vor. Nach einem bereits 1964 erschienenen Aufsatz von WITTENBERG⁴¹⁾, der am Beispiel der Maschinenzuverlässigkeit einige Zusammenhänge grundlegend darstellt, und MASING⁴²⁾, der mehr generelle Hinweise gibt, erschienen in Fachzeitschriften⁴³⁾ kleinere Aufsätze zu spezielleren Fragestellungen⁴⁴⁾.

-
- 35) DOMBROWSKI, E., Einführung in die Zuverlässigkeit elektronischer Geräte und Systeme, Berlin 1970
 - 36) STÖRMER, H., Mathematische Theorie der Zuverlässigkeit, München 1970
 - 37) HOFMANN, W., Zuverlässigkeit von Meß-, Steuer-, Regel- und Sicherheitssystemen, München 1968
 - 38) SMITH, C.S., Exakte Methoden der Qualitätskontrolle und Zuverlässigkeitsprüfung, München 1970 (Übers. a. d. Englischen)
 - 39) NARESKY, J.J., Zuverlässigkeit, in: BEUTH-Vertrieb, Handbuch des Industrial Engineering, Erg. Band, Berlin-Köln-Frankfurt o.J., S. 609 ff (Übers. a. d. Englischen)
 - 40) MESSERSCHMIDT-BÖLKOW-BLOHM (Hrsg.), Technische Zuverlässigkeit, Berlin-Heidelberg-New York 1971
 - 41) WITTENBERG, U.H., Zur Frage des Zuverlässigkeitsgrades von Maschinen, Ufo 8 (1964), S. 80 ff
 - 42) MASING, W., Zuverlässigkeit als wirtschaftliches Problem, TZ 1 (1964) 1, S. 33 ff; ders., Qualitätsplanung, QZ 15 (1970) 4, S. 90 ff
 - 43) Hier ist besonders auf die Zeitschrift "Qualität und Zuverlässigkeit", Freiburg, hinzuweisen (zit. "QZ")
 - 44) KASPER, E.F., Verschleißgrad und Austauschrate als Hilfe bei Absatzprognosen, ZfbF 24 (1972) S. 281 ff; KÜHNLEIN, H.-TRÖTSCH, E., Zwei Verfahren für detaillierte Zuverlässigkeitsanalysen von Flugzeugen mit Hilfe eines Rechners, AuPF 12 (1971) 1, S. 27 ff; GROSS, H., Zuverlässigkeitsmanagement als Element der Systemführung, QZ 14 (1969) 11/12, S. 146 ff

In letzter Zeit haben HARTMANN sowie SCHALTEGGER⁴⁵⁾ mehrfach diese Thematik aufgegriffen, wobei auch sie mehr generell über Ansatzpunkte betriebswirtschaftlicher Forschung referieren, während SCHIEMENZ in größerem Zusammenhang einer das gesamte betriebliche Geschehen umfassenden mathematischen Systemtheorie auf diesen Komplex hinweist.⁴⁶⁾ Eine Sonderstellung nimmt die recht umfangreiche Monographie von OPFERMANN: "Kostenoptimale Zuverlässigkeit produktiver Systeme" ein. Der Wortlaut des Titels läßt zunächst vermuten, daß OPFERMANN ganz im Sinne der mathematisch-systemtheoretisch arbeitenden Zuverlässigkeitstheorie an die Materie herangeht. Das ist aber nicht der Fall. Wie man bereits dem Literaturverzeichnis entnehmen kann, baut er seine Arbeit unabhängig vom wichtigen Schrifttum der Zuverlässigkeits- und Systemtheorie auf. Dementsprechend versteht er produktive Systeme nicht als einen speziellen Fall von Systemen schlechthin, an denen das notwendige Instrumentarium soweit entwickelt werden muß, wie es keine spezielle Eigenschaft eines produktiven Systems betrifft.⁴⁷⁾ So stellt z.B. seine Definition der Systemzuverlässigkeit ganz auf die betrieblichen Leistungserstellungs- und -verwertungsprozesse ab, und er betrachtet auch nur vorübergehende, nicht existenzbedrohende Störungen.⁴⁸⁾ Die Folge ist, daß seine Modelle zu kasuistisch aufgebaut sind, so daß das übergreifende Prinzip der Systemtheorie nicht zum Tragen kommen kann.

45) HARTMANN, W.L., Kybernetik, Grundlage moderner Sicherheitsanalysen, IO 38 (1969) 7 (zit. "Kybernetik"), S. 319 ff; ders., Zuverlässigkeit und Systemsicherheit, IO 39 (1970) 2 (zit. "Zuverlässigkeit"), S.89 ff; ders., Theoretische Überlegungen zur vorbeugenden Instandhaltung, IO 40 (1971) 5, S. 197 ff; SCHALTEGGER, P., Mathematische Zuverlässigkeitstheorie IO 39 (1970) 2, S.73 ff

46) SCHIEMENZ, B., Mathematische Syst., S.785

47) OPFERMANN versteht unter produktiven Systemen sogar nur betriebliche Systeme.

3. Mathematische Behandlung der Systemzuverlässigkeit

Da der Zuverlässigkeitsdefinition in Kap. 2.2. ein Wahrscheinlichkeitskonzept zugrunde liegt, sind die mathematischen Methoden der Zuverlässigkeitstheorie im Grunde nur spezielle Ausprägungen der allgemeinen Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik.⁴⁹⁾ Es soll daher nur auf einige grundlegende Zusammenhänge, soweit sie für die weiteren Erörterungen wesentlich sind, eingegangen werden. Hierfür werden zusätzlich einige vereinfachende Voraussetzungen postuliert, die jedoch durchaus realistisch sind, den praktischen Erkenntniswert der Überlegungen nicht entscheidend schmälern und bei vertieftem Eindringen in die Theorie im übrigen auch nicht vorausgesetzt werden müssen.

Für einen System- oder Elementeausfall sei nur ein binäres Modell unterstellt, d.h. es werden als mögliche Systemzustände nur "Brauchbar" und "Unbrauchbar" betrachtet. Solche gelegentlich als "simpl" bezeichneten Einheiten⁵⁰⁾ haben als Zustandsraum nur die Zahlenmenge $\{0,1\}$ zur Verfügung, so daß der Zustandsraum eines aus N Elementen aufgebauten Systems die Menge der Eckpunkte des

48) OPFERMANN, K., Kostenoptimale Zuv., S. 21: "Demnach richtet sich unser Interesse ausschließlich auf die Probleme, die sich aus den vorübergehenden und nicht existenzbedrohenden Störungen des betrieblichen Produktions- und Absatzprozesses ergeben."; S.30: "Demnach bleiben solche Vorgänge als Störungsursachen außer Betracht, die nicht zu einem Produktions- oder Absatzausfall führen, sondern nur unerwünschte Veränderungen an den hergestellten Erzeugnissen nach sich ziehen."

49) Hinsichtlich einer umfassenden mathematischen Darstellung s. GNEDENKO-BELJAJEW-SOLOWJEW, Zuverlässigkeitstheorie I,II

50) BORTFELDT, O., Methoden zur Analyse von redundanten Schaltungen mit heißer Reserve, TZ 2 (1965) 5 (zit. "Methoden"), S.63 ff

Einheitswürfels im N-dimensionalen Zahlenraum ist.⁵¹⁾

Da sich Elementeeigenschaften meist nicht plötzlich sondern mehr sukzessive verschlechtern, benötigt das binäre Modell mindestens exakt definierte zulässige Toleranzen, um eine solche "Entweder-Oder"-Entscheidung treffen zu können.⁵²⁾

Weiterhin sei angenommen, daß die Elemente unabhängig voneinander ausfallen. Der Ausfall einer beliebigen Gruppe von Elementen soll nicht die Fähigkeit der übrigen Elemente, den von ihnen geforderten Systembeitrag zu leisten, verändern.⁵³⁾

Im übrigen sollen nicht eingeschaltete Elemente ihre Eigenschaften nicht verlieren, d.h. im Augenblick der Inbetriebnahme sollen sie grundsätzlich funktionstüchtig sein.

3.1. Ausfalldichte und Zuverlässigkeitsfunktion

Zufallsvariable ist die stetige Zeitgröße T . Sie bezeichnet die unterschiedliche Aktivitätsdauer gleicher Systeme aus einer Grundgesamtheit bis zum Eintreten eines Ausfalls. Für die Wahrscheinlichkeit, daß ein Ausfall im Zeitintervall $(0, t)$ auftritt, wobei t die vorgesehene Aktivitätsdauer des Systems bezeichnet, gilt daher

$$(1) \quad Q(t) = P(T \leq t)$$

Da es sich bei T um eine kontinuierliche Zufallsvariable

51) BORTFELDT, O., Methoden, S.64

52) s.a. LLOYD-LIPOW, Reliability, S.220

53) In welcher Weise die mathematischen Beziehungen durch die Annahme von gegenseitig abhängigen Elementen beeinflusst werden, zeigen GNEDENKO-BELJAJEW-SOLOWJEW, Zuverlässigkeitstheorie I, S.116 ff

handelt, die nur Werte zwischen 0 und $+\infty$ annehmen kann, gilt für den Zusammenhang mit der Ausfalldichte $f(t)$ weiterhin:

$$(2) \quad Q(t) = \int_0^t f(t') dt' \quad \text{bzw.} \quad \frac{dQ(t)}{dt} = f(t)$$

Die Ausfallwahrscheinlichkeit oder Unzuverlässigkeit $Q(t)$ des Systems ist das komplementäre Ereignis zur Systemzuverlässigkeit $R(t)$.

$$(3) \quad R(t) = 1 - Q(t)$$

Gleichung (2) und (3) ergeben zusammengefaßt:

$$(4) \quad R(t) = 1 - \int_0^t f(t') dt'$$

Für die zeitliche Ableitung der Zuverlässigkeit $R(t)$ folgt:

$$(5) \quad \frac{dR(t)}{dt} = - \frac{dQ(t)}{dt}$$

$$(6) \quad f(t) = - \frac{dR(t)}{dt}$$

Da ein System zum Zeitpunkt 0 definitionsgemäß noch nicht ausgefallen sein kann, und es außerdem grundsätzlich nicht unendlich lang ohne Ausfall arbeitet, muß die Zuverlässigkeitsfunktion $R(t)$ von $R(0) = 1$ monoton zum Wert $R(\infty) = 0$ abfallen. Die Ausfallrate muß demnach der Bedingung genügen:

$$(7) \quad \int_0^{\infty} f(t) dt = 1$$

3.2. Ausfallrate und mittlere Lebensdauer

Wichtigstes lokales Charakteristikum der Zuverlässigkeit ist die Ausfallrate $\lambda(t)$, die die Wahrscheinlichkeit dafür angibt, daß ein im Zeitintervall $(0,t)$ nicht ausgefallenes System in der folgenden Zeiteinheit dt ausfällt. Die Ausfallrate ergibt sich demnach als Grenzwert des Verhältnisses der in der folgenden Zeiteinheit eingetretenen Ausfälle zu den bis t nicht eingetretenen Ausfällen.

$$(8) \quad \lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \lambda(t, t+\Delta t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t+\Delta t)}{\Delta t \cdot R(t)}$$

$$(9) \quad \lambda(t) = \frac{1}{R(t)} \left(- \frac{dR(t)}{dt} \right) = \frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dQ(t)}{dt}$$

$$(10)^{54)} \quad \lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Durch Integration ergibt sich aus Gleichung (9) für die Zuverlässigkeit $R(t)$:

$$(11) \quad \frac{dR(t)}{R(t)} = - \lambda(t) dt$$

$$(12) \quad R(t) = \exp \left(- \int_0^t \lambda(t') dt' \right)$$

54) Im amerikanischen Schrifttum wird dieser Ausdruck als "hazard rate" oder "force of mortality" bezeichnet, während der für die experimentelle Bestimmung wichtige Differenzenquotient $\lambda(t, t+\Delta t)$ "failure rate" genannt wird. DIN 40041 unterscheidet dementsprechend zwischen Ausfallquote $\lambda(t, t+\Delta t)$ und Ausfallrate $\lambda(t)$. Der Übersetzer von NARESKY, Zuverlässigkeit, S.611 verwendet den Begriff Ausfallrate für $\lambda(t, t+\Delta t)$, während er $\lambda(t)$ Wagnisrate nennt.

Die praktische Bestimmung der Ausfallrate bereitet häufig erhebliche Schwierigkeiten. Bei der attributiven Methode zählt man die tatsächlich eingetretenen Ausfälle. Bei Systemen hoher Lebensdauer kann die Ermittlung daher außerordentlich zeitraubend und mit hohen Kosten verbunden sein, zumal auch wegen der Streuung solcher Zeitwerte der Stichprobenumfang nicht zu klein gewählt werden darf. Man verwendet in solchen Fällen deshalb oft die distributive Methode, bei der die statistische Verteilung der Verschlechterung von Systemeigenschaften durch Messungen ermittelt wird, von denen aus dann auf die zu erwartenden Ausfallzeitpunkte extrapoliert werden kann.⁵⁵⁾ Neben der Ausfallrate $\lambda(t)$ ist auch die mittlere Lebensdauer Θ (mean life) des Systems - der Erwartungswert $E(T)$ der Zufallsvariablen T - von Bedeutung.

$$(13) \quad E(T) = \Theta = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt$$

Durch partielle Integration erhält man:

$$(14) \quad \Theta = \int_0^{\infty} R(t) dt - t \cdot R(t) \Big|_0^{\infty}$$

Wegen $R(\infty) = 0$ folgt hieraus:

$$(15) \quad \Theta = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

Praktisch kann Θ ermittelt werden als arithmetisches Mittel der Zeiten bis zum Ausfall beobachtet an n Systemen.

55) vgl. DEIXLER, A., Zählende und messende Methoden für Zuverlässigkeitsangaben, TZ 4 (1967) 9, S. 11 ff (zit. "Zählende")

3.3. Spezielle Verteilungsfunktionen

Nahezu alle in der Literatur bekannt gewordenen Verteilungen einer Zufallsvariablen spielen auch in der Zuverlässigkeitstheorie eine mehr oder weniger wichtige Rolle.⁵⁶⁾ Unmittelbar einleuchtend ist die Anwendbarkeit der diskreten Verteilungen, wenn als Zufallsvariable das diskrete Ereignis "Zahl der Ausfälle" betrachtet wird.

Als kontinuierliche Verteilungsfunktionen, die das Verhalten der stetigen Zufallsvariablen T beschreiben können, eignen sich prinzipiell alle Funktionen, die zwischen $t=0$ und $t=\infty$ monoton fallen und für die die Bedingung (7) gilt.

Der Betriebswirt kann sich jedoch zunächst auf die im Folgenden näher behandelten Verteilungsfunktionen beschränken, da diese die in der betrieblichen Praxis am häufigsten auftretenden Ausfallphänomene ausreichend beschreiben können.

3.3.1. Exponentialverteilung

Treten die beobachteten Ausfälle plötzlich und ohne erkennbaren Zusammenhang zu Einflußgrößen auf, so handelt es sich um echte Zufallsereignisse. Es muß dann damit gerechnet werden, daß in jeder Zeiteinheit immer der gleiche Prozentsatz der noch nicht ausgefallenen Elemente ausfällt. Die Ausfallrate ist damit keine Funktion der Aktivitätsdauer t :⁵⁷⁾

$$\lambda(t) = \lambda \rightarrow \text{const.}$$

56) GNEDENKO-BELJAJEW-SOLOWJEW, Zuverlässigkeitstheorie I, S. 12 ff

57) ebenda, S. 79

Aus Gleichung (12) erhält man:

$$(16)^{58)} \quad R(t) = e^{-\lambda t}$$

Die Ausfallrate $f(t)$ dieser Exponentialverteilung ist gegeben durch das Differential nach der Zeit t :

$$(17) \quad f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$$

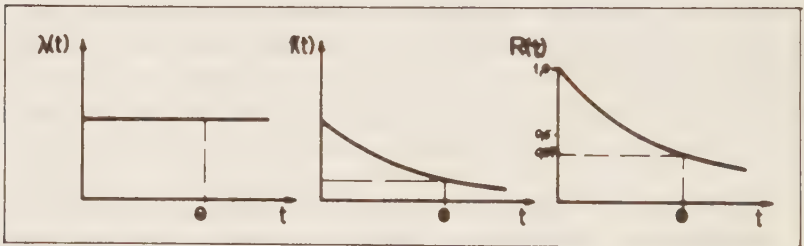


Abb.1: 59) Schematischer Verlauf von Ausfallrate, Ausfall-dichte und Zuverlässigkeitsfunktion bei der Exponentialverteilung

Aus Gleichung (15) folgt für die mittlere Lebensdauer θ :

$$\theta = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = -\frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t} \Big|_0^{\infty}$$

$$(18) \quad \theta = \frac{1}{\lambda}$$

58) Dasselbe Ergebnis erhält man auch aus der POISSON-Verteilung, wenn eine durchschnittliche Ausfallrate $\lambda = \text{const.}$ angenommen wird. Für den Mittelwert $\mu = \lambda \cdot t$ und $x = 0$ (kein Ausfall) gilt dann:

$$F(x) = e^{-\lambda t} \cdot \sum \frac{(\lambda \cdot t)^x}{x!} \rightarrow R(t) = e^{-\lambda t}$$

59) WONG, K.L., Reliability Mathematics (zit. "Rel.Math."), in: MYERS-WONG-GORDY, Rel.Engineering, S.20;
 HUMMITZSCH, P., Zuverlässigkeit, S.30

$$(19) \quad R(t) = e^{-t/\Theta}$$

Bei Vorliegen einer konstanten Ausfallrate - und nur dann - beschreibt Θ die Zuverlässigkeit genauso eindeutig wie die Ausfallrate λ . Während $t = \Theta$ fallen 63 % aller Elemente aus ($R(t) = e^{-1} \hat{=} 0,37$). Hieraus folgt, daß bei einer Aktivitätsdauer der Länge Θ die Zuverlässigkeit nur noch gering ist.

Mit guter Näherung kann die Exponentialverteilung auch das Ausfallverhalten eines komplexen Systems beschreiben, da sich die zeitabhängigen Ausfallraten $\lambda(t)$ der Systemelemente derart überlagern, daß für das gesamte System zu jedem Zeitpunkt immer etwa mit konstanter Ausfallrate gerechnet werden kann.⁶⁰⁾

Da die Exponentialverteilung auf besonders bequem lösbare Gleichungen führt, ist die Versuchung groß, diese auch in Fällen anzuwenden, wo ihre Gültigkeit nicht gesichert ist.⁶¹⁾ Um ihr trotzdem eine breitere Anwendbarkeit zu verschaffen, wird sie in der amerikanischen Praxis auch in modifizierter Form

$$(20) \quad R(t) = e^{-\lambda \cdot k_A \cdot k_E \cdot t}$$

60) REDEKER, G., Technische und betriebswirtschaftliche Grundlagen für die Methodenwahl bei der Erhaltung betrieblicher Anlagen, Diss. TU Hannover 1969 (zit. "Methodenwahl"), S.63: R. weist diesen Zusammenhang für komplexe, mechanische Systeme mit normalverteiltem Ausfallverhalten der Systemelemente nach; s.a. NARESKY, J.J., Zuverlässigkeit, S.616 f

61) vgl. PARR, H.-WEBSTER, J.R., A Method for Discriminating between Failure Density Functions Used in Reliability Predictions, Techn 7 (1965), S.1: "The present use of the exponential distribution seems to be based more on convenience than conviction."; GNEDENKO-BELJAJEW-SOLOWJEV, Zuverlässigkeitstheorie I, S.81

verwendet.⁶²⁾ Der Faktor k_A berücksichtigt dabei das Verhältnis Istbelastung zu Nennbelastung, während k_E Korrekturfaktor für Umgebungseinflüsse ist.

3.3.2. Normalverteilung

Sind die Ausfälle Folge von Abnutzung oder anderen irreversiblen Zerstörungs- und Alterungsprozessen, so häufen sich die Ausfallzeiten um eine bestimmte mittlere Aktivitätsdauer der Elemente. Mathematisch kann dieses Ausfallverhalten durch die GAUSS'sche Normalverteilung charakterisiert werden.

$$(21) \quad R(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-Z^2/2} dt'$$

$$(22) \quad f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-Z^2/2} \quad \text{mit } Z = \frac{t-\theta}{\sigma}$$

$$(23) \quad \lambda(t) = e^{-Z^2/2} / \int_t^{\infty} e^{-Z^2/2} dt'$$

Die Ausfallrate $\lambda(t)$ wächst monoton mit der Zeit t an und nähert sich asymptotisch der Geraden⁶³⁾ $y = (t-\theta)/\sigma$. Im Gegensatz zur Exponentialverteilung, bei der der Zeitpunkt $t = 0$ vollkommen willkürlich gesetzt werden kann, muß t hier immer die vorangegangene Aktivitätsdauer mit umfassen.

62) SCHMID, R.C., Einige einfache Hilfsmittel bei Zuverlässigkeitsüberlegungen, TZ 2 (1965) (zit. "Hilfsmittel"), S.92 f

63) vgl. GNEDENKO-BELJAJEW-SOLOWJEW, Zuverlässigkeitstheorie I, S.82

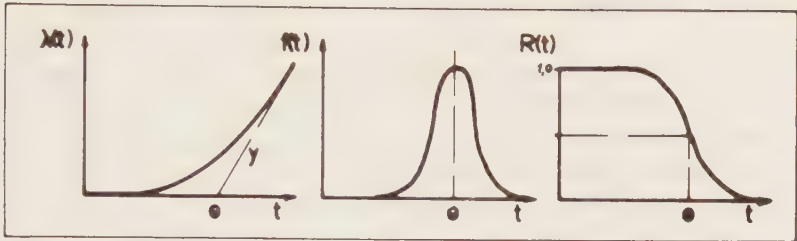


Abb.2: Schematischer Verlauf von Ausfallrate, Ausfall-
dichte und Zuverlässigkeitsfunktion bei der
Normalverteilung ⁶⁴⁾

Bei der Normalverteilung liegen die größten Zuverlässigkeitsverluste in der Nähe der mittleren Lebensdauer θ .

Da Zeitwerte niemals negativ sein können, das Argument t bei der GAUSS-Verteilung aber von $-\infty$ bis $+\infty$ läuft, dürfte vom streng mathematischen Standpunkt aus diese Verteilung nicht angewendet werden. Wenn der im negativen Bereich von t liegende Flächenanteil von Gl. (21) vernachlässigbar klein ist, d.h. $\theta \gg \sigma$, bestehen gegen ihre praktische Anwendung jedoch keine Bedenken. ⁶⁵⁾ In jedem Fall überwunden werden kann dieses Dilemma durch Anwendung der log-Normalverteilung, deren Argument nur positive Werte durchläuft. Für die relativierte Zufallsvariable Z ist dann zu setzen:

$$(24) \quad Z = \frac{\ln(t - \theta)}{\sigma}$$

64) WONG, K.L., Rel-Math., S.20; HUMMITZSCH, P., Zuverlässigkeit, S.30

65) MESSERSCHMIDT-BÖLKOW-BLOHM, Tech. Zuv., S.82 f; BAZOVSKY, J., Reliability, S.36 ff; WONG, K.L., Rel-Math., S.17; DOMBROWSKY, E., Einführung, S.34; trotzdem ablehnend aus prinzipiellen Erwägungen BÜRK, G., Statistische Gesetzmäßigkeiten von Ausfallzeiten..., in: BUSSMANN, K.F.-MERTENS, P. (Hrsg.), Operations Research und Datenverarbeitung bei der Instandhaltungsplanung, Stuttgart 1968 (zit. "Operations Res."), S.20

3.3.3. WEIBULL-Verteilung

Breite Anwendung in der Zuverlässigkeitstechnik findet die WEIBULL-Verteilung, da sie die verschiedenartigsten Ausfallphänomene beschreiben kann. Sie hat in unterschiedlicher Schreibweise als e-Funktion höherer Ordnung Eingang in die Literatur gefunden:⁶⁶⁾

$$(25) \quad R(t) = e^{-(1/\alpha)t^\beta}$$

$$(26) \quad f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \cdot t^{\beta-1} \cdot e^{-(1/\alpha)t^\beta}$$

$$(27) \quad \lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \cdot t^{\beta-1}$$

Durch Änderung ihrer festen Parameter kann der Funktionsverlauf weitgehend an empirische Ergebnisse angepaßt werden. Für $\beta > 1$ nimmt $\lambda(t)$ mit wachsendem t zu, so daß zusammen mit einem hinreichend großen α Normalverteilungen approximiert werden können. Für $\beta < 1$ nimmt $\lambda(t)$ mit wachsendem t ab. Dieser Fall kennzeichnet besonders die zu Beginn der Aktivitätsdauer eines Systems zu beobachtenden Frühausfälle, die auf versteckte Mängel zurückzuführen sind. Als wichtigen Sonderfall enthält die WEIBULL-Verteilung für $\beta = 1$ auch die Exponentialverteilung.

66) MESSERSCHMIDT-BÖLKOW-BLOHM, Tech.Zuv., S.79: auch

$R(t) = \exp[-(t/\gamma)^\beta]$; DOMBROWSKI, E., Einführung, S.36:

$R(t) = \exp\left[-\frac{(x-\gamma)^\beta}{\alpha}\right]$

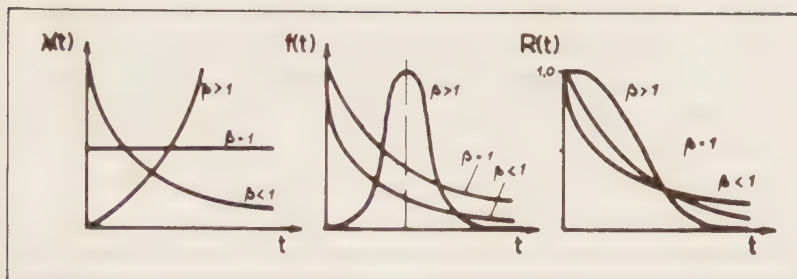


Abb.3: Schematischer Verlauf von Ausfallrate, Ausfalldichte und Zuverlässigkeitsfunktion der WEIBULL-Verteilung für verschiedene Werte von β .⁶⁷⁾

Mittlere Lebensdauer und Dispersion können nicht in elementarer Algebra dargestellt werden, solange β nicht bestimmt ist.⁶⁸⁾

3.4. Zuverlässigkeit von Systemen

Vorteil des Systemansatzes ist, daß das Zuverlässigkeitsverhalten nicht am Gesamtsystem ermittelt werden muß, sondern daß aus dem Verhalten von Subsystemen und deren Input-Output-Beziehungen untereinander auf die Systemzuverlässigkeit geschlossen werden kann. Wird dabei das System in elementare Einheiten zerlegt, d.h. in typische Subsysteme, die in den verschiedensten Kombinationen immer wieder als in sich geschlossene Bausteine auftreten, so ist es sinnvoll, das hierüber ermittelte Zuverlässigkeitsmaterial zu katalogisieren, um auf dieses im jeweils konkreten Anwendungsfall zurückgreifen zu können.

⁶⁷⁾ WONG, K.L., Rel.Math., S.20

⁶⁸⁾ GNEDENKO-BELJAJEW-SOLOWJEW, Zuverlässigkeitstheorie I, S.83 f

Die logische Verknüpfung der Input- und Outputsignale der einzelnen Systemelemente untereinander wird am übersichtlichsten zunächst in Logikdiagrammen (Signalflußbildern) erfaßt. Meist erfolgt die Darstellung in Graphen, wobei die Signaltransformation durch Kanten und die Signale selbst durch Knoten symbolisiert sind.⁶⁹⁾

Die logische Anordnung der Subsysteme kann dabei nicht ohne weiteres aus dem äußerlichen Schaltbild entnommen werden. Entsprechend den folgenden Überlegungen sind z.B. die Instanzen des "middle management", da alle zusammen funktionsnotwendig für die Unternehmung sind, logisch in Reihe geschaltet, obwohl sie im Organisationsschema meist parallel liegen. Umgekehrt sind tatsächlich in Reihe geschaltete Kontrollinstanzen logisch parallel angeordnet, da sie sich gegenseitig absichern sollen.

Die Graphendarstellung kann dann in mengenalgebraischer Schreibweise geschlossen formuliert werden,⁷⁰⁾ die ihrerseits durch Bildung algebraischer Zuverlässigkeitsäquivalente in eine Bestimmungsgleichung der Systemzuverlässigkeit überführt werden kann.

3.4.1. Logische Reihenschaltung

Systemelemente sind dann logisch in Reihe geschaltet, wenn durch den Ausfall einer Einheit das gesamte System ausfällt.

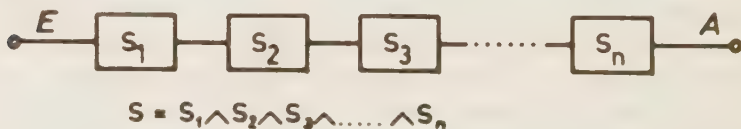


Abb.4: Logische Reihenschaltung

69) SCHNITZLER-SCHÜRGER-SCHWEIZER, Flugregelungssyst., S.60 ff

70) ebenda, S.60; SCHIEMENZ, B., Regelungstheorie, S.72

Arbeiten die Elemente S_i unabhängig voneinander, so ist die Wahrscheinlichkeit, daß kein Element S_i ausgefallen ist, gegeben durch:

$$(29) \quad P(S_1 \wedge S_2 \wedge \dots \wedge S_n) = P(S_1) \cdot P(S_2) \cdot \dots \cdot P(S_n)$$

Im Hinblick auf die Zuverlässigkeit der Transformation eines Inputs bedeutet dies, daß das Signal nach dem Durchlaufen des Systemelements i um den Faktor $R_i(t)$ unzuverlässiger geworden ist. Die Systemzuverlässigkeit $R(t)$ der logischen Reihenschaltung bestehend aus n Elementen ist daher gegeben durch die Beziehungen:

$$(30) \quad R(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$$

resp. für gleiche $R_i(t)$

$$(31) \quad R(t) = R_0(t)^n$$

oder mit Gleichung (12) allgemein:

$$(32) \quad R(t) = \prod_{i=1}^n \left[\exp\left(-\int_0^t \lambda_i(t') dt'\right) \right]$$

Die Systemzuverlässigkeit ist demnach kleiner als die Zuverlässigkeit des unzuverlässigsten Systemelementes. Mit wachsender Anzahl der seriell geschalteten Elemente nimmt die Zuverlässigkeit des Systems sehr schnell ab. Ein System bestehend aus $n = 300$ Elementen, die alle die verhältnismäßig hohe Einzelzuverlässigkeit $R_0(t) = 0,99$ aufweisen, hat nur noch eine Gesamtzuverlässigkeit von weniger als 5 % ($R(t) = 0,99^{300} \approx 0,05$). Die Wahrscheinlichkeit, daß das System vor Ablauf der vorgesehenen Aktivitätsdauer t zusammenbricht, ist damit größer als 95 %.

Legt man ein exponentialverteiltes Ausfallverhalten zugrunde, so vereinfacht sich Gleichung (32) zu

$$(33) \quad R(t) = e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdot \dots \cdot e^{-\lambda_n t}$$

$$(34) \quad R(t) = \exp [-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t] = \exp \left(- \sum_{i=1}^n \lambda_i t \right)$$

Wegen des Zusammenhanges $\Theta = 1/\lambda$, Gl. (18), gilt dann für die mittlere Lebensdauer Θ des Systems:

$$(35) \quad \Theta = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n}$$

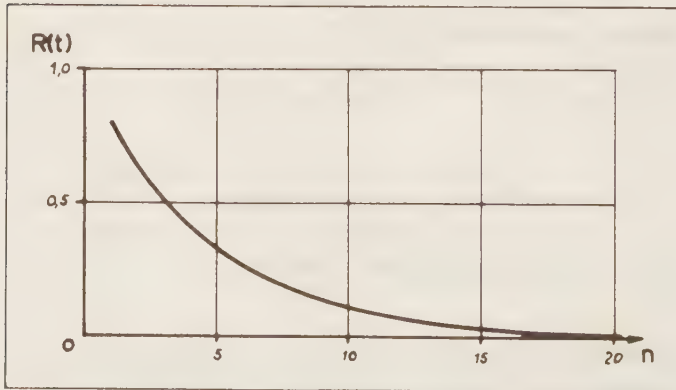


Abb. 5: Verlauf der Systemzuverlässigkeit bei Reihenschaltung für $R_0(t) = 0,8$

3.4.2. Logische Parallelschaltung

Neben der Reihenschaltung besteht als zweite elementare Anordnung die logische Parallelschaltung.

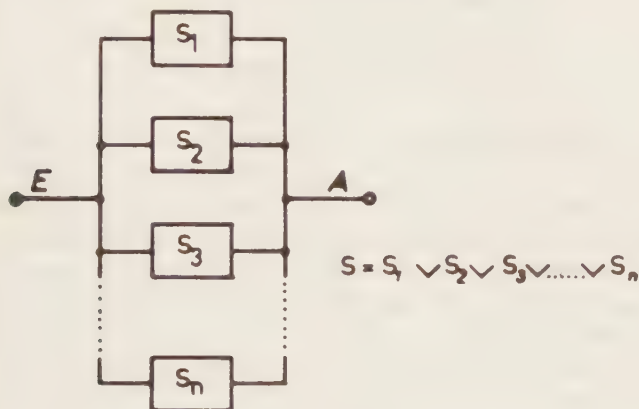


Abb.6: Logische Parallelschaltung

Sie ist dadurch gekennzeichnet, daß der Input n gleichwertige Transformationskanäle zur Wahl hat, um von E nach A zu gelangen, d.h. das System fällt erst dann aus, wenn alle n Elemente ausgefallen sind. Für die grundsätzliche Funktion des Systems ist nur ein Element erforderlich, so daß $(n - 1)$ Elemente zunächst überflüssig sind. Sie werden deshalb als Redundanzen bezeichnet. Redundante Systeme sind immer zuverlässiger als ihr unzuverlässigstes Element. J.v.NEUMANN⁷¹⁾ hat hieraus eine grundlegende Philosophie über den Aufbau zuverlässiger Systeme aus unzuverlässigen Komponenten abgeleitet.

71) v.NEUMANN, J., Probabilistic Logics and the Synthesis of Reliable Organisms from Unreliable Components, in: Automata Studies, Princeton 1956, S.43 ff

Redundante Systeme müssen in vier Gruppen eingeteilt werden, für die jeweils unterschiedliche Zuverlässigkeitsrelationen gelten:

1. heiße Redundanz
2. kalte Redundanz⁷²⁾
3. warme Redundanz
4. gleitende Redundanz

3.4.2.1. Heiße Redundanz

Bei der heißen Redundanz⁷³⁾ unterliegt jedes Element während der gesamten Aktivitätsdauer des Systems der gleichen Beanspruchung, d.h. es ist immer gleichbleibend belastet und arbeitet unabhängig von den Ausfällen der übrigen Systemelemente. Bei einfacher Redundanz ist dann die Zuverlässigkeit $R(t)$ des Systems gegeben durch die Wahrscheinlichkeit, daß S_1 oder S_2 oder beide nicht ausgefallen sind.

$$(36) \quad P(S_1 \vee S_2) = P(S_1) + P(S_2) - P(S_1) \cdot P(S_2)$$

$$(37) \quad R(t) = R_1(t) + R_2(t) - R_1(t) \cdot R_2(t)$$

Durch Umrechnung mit Hilfe der Beziehung (3) ergibt sich hieraus:

$$(38) \quad R(t) = 1 - Q_1(t) \cdot Q_2(t)$$

72) Für heiße und kalte Redundanzen findet man im Schrifttum mehrere teilweise sogar widersprüchliche Begriffe. Hinsichtlich einer Zusammenstellung dieser Termini vgl. ZEEP, W., Redundanz - ein Mittel zur Steigerung der Zuverlässigkeit von technischen Systemen (zit. "Redundanz"), in: BUSSMANN-MERTENS, Operations Res., S.83 ff

73) ausführliche Darstellung bei GNEDENKO-BELJAJEW-SOLOWJEW, Zuverlässigkeitstheorie I, S.135 ff

oder allgemein für n Elemente:

$$(39) \quad Q(t) = \prod_{i=1}^n Q_i(t)$$

$$(40) \quad R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t))$$

Während im Falle der logischen Serienschaltung die Zuverlässigkeiten $R_i(t)$ miteinander multipliziert werden müssen, multiplizieren sich im Fall der logischen Parallelschaltung die Unzuverlässigkeiten $Q_i(t)$. Jedes redundante Element sichert also die Unzuverlässigkeit der anderen Elemente nur mit der ihm eigenen Zuverlässigkeit ab.

Im Regelfall werden Elemente mit gleichen Systemeigenschaften parallelgeschaltet, d.h. $Q_i(t) = Q_1(t)$. Die Gleichungen (39) und (40) vereinfachen sich dann zu:

$$(41) \quad Q(t) = Q_1(t)^n$$

$$(42) \quad R(t) = 1 - Q_1(t)^n = 1 - (1 - R_1(t))^n$$

Wird ein exponentielles Ausfallverhalten zugrunde gelegt, ergibt sich hieraus:

$$(43) \quad R(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^n$$

Die Ausfallrate dieses Systems ist nicht mehr eine Konstante, sondern eine Zeitabhängige,⁷⁴⁾ wie in Abb.7

74) vgl. Serienschaltung Kap. 3.4.1.: hier ist die Ausfallrate des Systems ebenfalls eine Konstante, s. Abb.7 (Kurve b)

(Kurve a) erkennbar.

Als weitere wichtige Beziehung sei noch die mittlere Lebensdauer Θ angegeben. Aus Gleichung (15) folgt:

$$\Theta = \int_0^{\infty} R(t) dt \rightarrow \int_0^{\infty} [1 - (1 - e^{-\lambda t})^n] dt$$

$$\Theta = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{2\lambda} + \frac{1}{3\lambda} + \dots + \frac{1}{n\lambda}$$

$$(44) \quad \Theta = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}$$

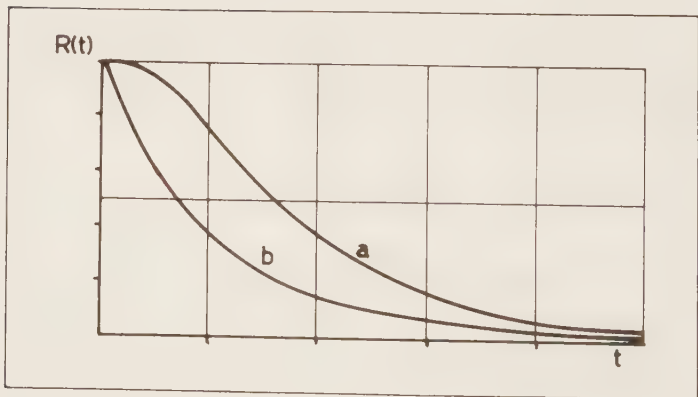


Abb.7: Zuverlässigkeitsfunktionen des einfachen (b) und verdreifachten (a) Systems

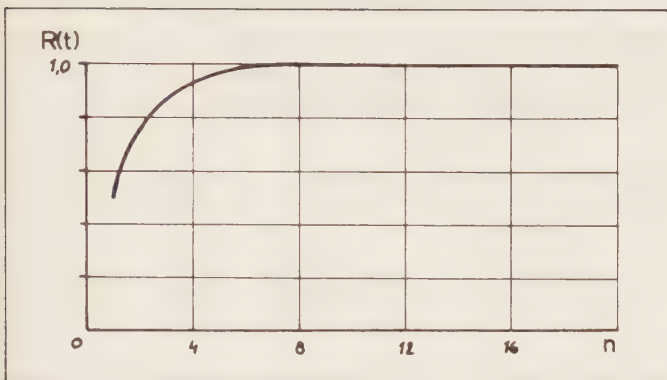


Abb.8: Verlauf der Zuverlässigkeit für n-fach heiße Redundanz gem.Gl.(42) mit $R_1(t) = 0,5$

3.4.2.2. Kalte Redundanz

Bei Systemen mit kalter Redundanz⁷⁵⁾ ist immer nur ein Element eingeschaltet, während die Redundanzen nicht belastet sind. Erst im Moment eines Ausfalls wird auf ein redundantes Element umgeschaltet, wobei angenommen werden soll, daß diese Umschaltung zeitlos vor sich geht, und daß der Schaltvorgang mit der Zuverlässigkeit $R_s(t) = 1$ vorgenommen werden kann, Abb.9.

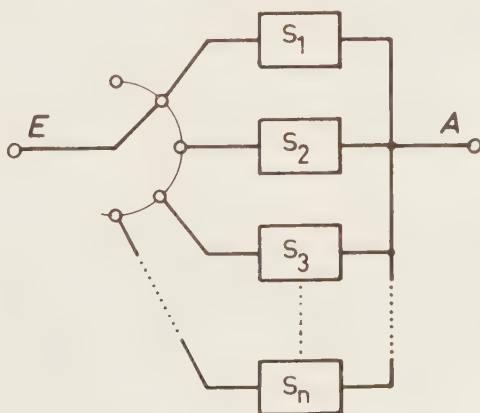


Abb.9: kalte Redundanz

Da die Darstellung der allgemeinen Verteilungsfunktion zu komplizierten Faltungsintegralen führt,⁷⁶⁾ sollen die Zusammenhänge hier nur für den Fall konstanter und gleicher Ausfallrate für alle Elemente gezeigt werden.⁷⁷⁾

Unter den gegebenen Voraussetzungen ist das Ausfallverhalten des Systems ein POISSON-Prozeß (vgl. Kap. 3.3.1.).

$$(45) \quad R(t) = e^{-\lambda t} \left(1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \frac{(\lambda t)^3}{3!} + \dots \right)$$

Hierbei repräsentieren die Terme $1, \lambda t, \frac{(\lambda t)^2}{2!}$ usw. die Wahrscheinlichkeiten, daß 0, 1, 2 usw. Einheiten während der Zeit t ausfallen. Die Zuverlässigkeit eines aus n Elementen bestehenden Systems mit kalter Redundanz ist somit durch die Wahrscheinlichkeit, daß höchstens $(n - 1)$ Elemente ausfallen, gegeben:

$$(46) \quad R(t) = e^{-\lambda t} \cdot \sum_{x=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^x}{x!}$$

$$\Theta = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} \cdot \sum_{x=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^x}{x!} dt$$

$$(47) \quad \Theta = \frac{n}{\lambda}$$

75) ausführliche Darstellung bei GNEDENKO-BELJAJEW-SOLOW-JEW, Zuverlässigkeitstheorie I, S.152 ff

76) vgl. ZEEP, W., Redundanz, S.92

77) s. BAZOVSKY, I., Reliability, S.112 ff; SANDLER, G.H., System, S.78 ff

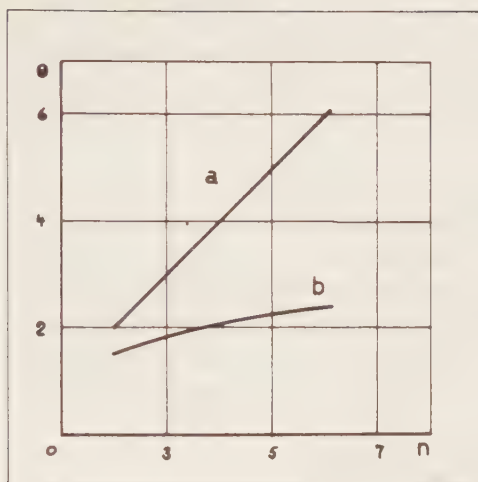


Abb.10: Mittlere Lebensdauer als Funktion von Redundanzen (a kalte Red., b heiße Red.) für $\lambda = 1$

Wie aus Abb.10 erkennbar, wächst die mittlere Lebensdauer Θ bei Anwendung der kalten Redundanz linear an, während sie nur mit der harmonischen Reihe bei heißen Redundanzen zunimmt. Dieser Vorteil der kalten Redundanz gegenüber der heißen wird allerdings dadurch relativiert, daß er von einer absoluten Zuverlässigkeit R_s der Schaltorgane ausgeht, die in Wirklichkeit nicht gegeben ist.⁷⁸⁾ Gleichung (45) müßte daher in der Weise abgewandelt werden, daß jede Elementausfallwahrscheinlichkeit noch mit der Zuverlässigkeit des Umschaltprozesses multipliziert wird, da dieser die Voraussetzung dafür ist, daß das Element überhaupt ausfallen kann.

$$(48) \quad R(t) = e^{-\lambda t} \left(1 - R_s \cdot \lambda(t) + R_s \cdot \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \dots \right)$$

78) vgl. GNEDENKO-BELJAJEW-SOLOWJEW, Zuverlässigkeitstheorie I, S.167; BAZOVSKY, I., Reliability, S.114

Die Überlegungen zur kalten Redundanz können auch zur Bildung eines Lagerhaltungs- und Ersatzteilbevorratungsmodells herangezogen werden, wenn die Anordnung von Redundanzen (Lagerteile) im Hinblick auf eine festzusetzende Systemzuverlässigkeit optimiert wird (vgl. Kap. 6.3.).

Als Sonderfall der kalten Redundanz sei noch auf die sog. warme Redundanz hingewiesen. Sie findet in den Fällen Anwendung, in denen man die redundanten Elemente nicht der vollen Belastung aussetzen möchte, um das Ausfallrisiko möglichst klein zu halten (vgl. Kap. 5.5.), in denen man die Elemente aber auch nicht kalt lagern kann, da bei Inbetriebnahme die Anlaufzeit zu lang wäre.⁷⁹⁾

3.4.2.3. Gleitende Redundanz

Das allgemeine Bestreben, Systeme in Baukastenbauweise zu erstellen, führt dazu, daß gleiche Systemelemente innerhalb eines Systems mehrfach verwendet werden. Besonders charakteristisch ist dieser Sachverhalt bei der Betrachtung des Menschen als Systemelement, der innerhalb eines Systems, z.B. in der Fließfertigung, die verschiedenartigsten Aufgaben übernehmen kann. In diesen Fällen ist es oft sinnvoller, nicht für jedes einzelne Subsystem Redundanzen vorzusehen, sondern eine Anzahl Reserveelemente (z.B. Springer) bereitzustellen, die dann fallweise an Ausfallstellen eingesetzt werden können.

⁷⁹⁾ vgl. FIEDENKO-BELJAJEW-SOLOWJEW, Zuverlässigkeitstheorie I, S.159 ff

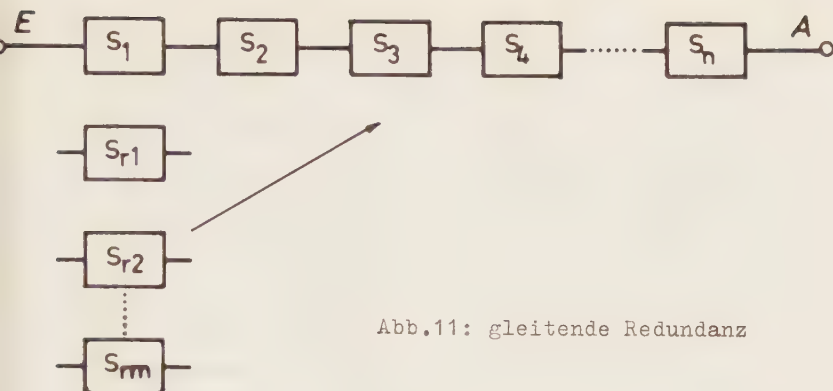


Abb.11: gleitende Redundanz

Bei heißer, m-fach gleitender Redundanz ist die Systemzuverlässigkeit gegeben durch die Binomialverteilung für höchstens m Ausfälle, da alle Elemente die voneinander unabhängigen, gleichen Ausfallwahrscheinlichkeiten $Q_0(t)$ haben. Es gilt daher:⁸⁰⁾

$$(49) \quad R(t) = \sum_{k=0}^m \binom{m+n}{k} Q_0(t)^k \cdot R_0(t)^{n+m-k}$$

Die Zuverlässigkeit bei kalter, m-fach gleitender Redundanz sei wie in Kap. 3.4.2.2. nur für exponentialverteiltes Ausfallverhalten dargestellt. In Gleichung (46) muß für λ dann nur die Ausfallrate der seriellen Elementeanordnung ($n \cdot \lambda$) eingesetzt werden.⁸⁰⁾

$$(50) \quad R(t) = e^{-n\lambda t} \cdot \sum_{x=0}^m \frac{(n\lambda t)^x}{x!}$$

80) GNEDENKO-BELJAJEW-SOLOWJEW, Zuverlässigkeitstheorie I, S.177

Die Anwendbarkeit dieser Modelle ist nicht unbedingt an das materielle Vorhandensein der redundanten Elemente gebunden. So kann die Bereitstellung von finanziellen Reserven zur Sicherung der Unternehmung⁸¹⁾ gegen unerwartete Störeinflüsse im Grunde als ein Sonderfall der kalten, gleitenden Redundanz aufgefaßt werden, da statt konkreter, redundanter Systemelemente, die sich in der Regel gegen einen weiterreichenden gleitenden Einsatz sperren, das übergeordnete Surrogat (liquide Mittel) redundant eingeplant wird. Insofern müssen die Sicherungsinstrumente der Unternehmung im größeren Zusammenhang gesehen werden, und sie bestehen im übrigen auch nicht ausschließlich in Reservierungen⁸²⁾, (vgl. Kap.5).

81) vgl. z.B. SCHRÖER, H.O., Sicherheit als Gegenstand der Unternehmungspolitik, Tübingen 1969 (zit. "Sicherheit"); HEINEN, E., Industriebetriebslehre als Entscheidungslehre, in: HEINEN, E., Industriebetriebslehre, Wiesbaden 1972, S.44 f

82) wie z.B. bei SCHRÖER, H.O., Sicherheit, S.146: "Der Bereitstellung von Sicherheitsinstrumenten hat ein spezifischer Reservierungsakt voranzugehen."

3.4.3. Vermaschte Schaltungen

In der Regel können betriebswirtschaftlich interessierende Systeme auf triviale Serien- oder Parallelverknüpfungen der Subsysteme zurückgeführt werden. Da diese beiden Basissysteme zuverlässigkeitsmathematisch leicht zu behandeln sind, ist es naheliegend, auch für Strukturen, die sich elementar nicht derart reduzieren lassen wie z.B. Brücken-, Stern- oder Kreisschaltungen (coherent structures), zuverlässigkeitstheoretisch äquivalente Schaltungen zu entwickeln, die nur aus eben diesen trivialen Elementarverknüpfungen bestehen. BORTFELDT erläutert in diesem Zusammenhang zwei Methoden:⁸³⁾

1. Die WEINSTOCKSche Reduktion durch Zerlegung des Systems in mehrere konjunktiv verbundene, kurzgeschlossene oder leerlaufende Teilsysteme.
2. Das OKADA- und ECARY-PROSCHANSche Reduktionstheorem, das davon ausgeht, daß jedes System als disjunktives Ersatzbild seiner Minimalwege darstellbar ist.

Auf diese Weise sind z.B. für die Brückenschaltung in Abb.12 insgesamt vier Minimalwege von E nach A vorhanden, die disjunktiv verknüpft werden müssen: (S_1, S_2) ; (S_3, S_4) ; (S_1, S_5, S_4) ; (S_3, S_5, S_2)

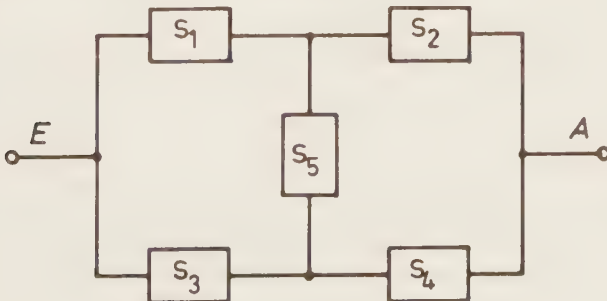


Abb.12: Brückenschaltung

In BOOLEscher Formulierung gilt daher:⁸⁴⁾

$$S = (S_1 \wedge S_2) \vee (S_3 \wedge S_4) \vee (S_1 \wedge S_5 \wedge S_4) \vee (S_3 \wedge S_5 \wedge S_2)$$

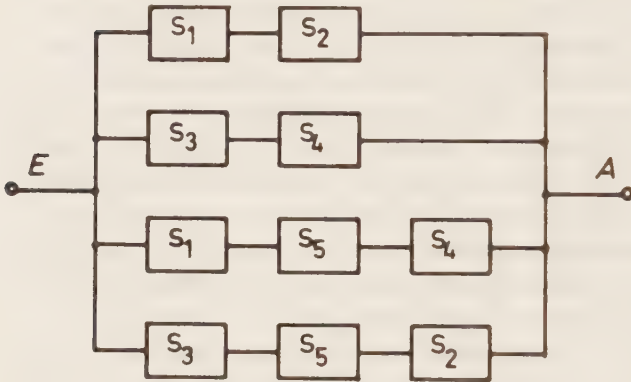


Abb.13: logisches Äquivalent zu Abb.12

Obwohl äußerlich wenig Ähnlichkeit zwischen Abb.12 und Abb.13 besteht, verhalten sie sich zuverlässigkeitstheoretisch identisch. Durch Anwendung logischer Umformungsregeln läßt sich die vorstehende Beziehung auch in die folgende Form überführen:

$$S = ((S_1 \vee (S_3 \wedge S_5)) \wedge (S_2 \vee (S_4 \wedge S_5))) \vee (S_3 \wedge S_4)$$

d.h. mit den Strukturdiagrammen Abbn. 12, 13 stimmt auch Abb.14 logisch überein:

83) BORTFELDT, O., Methoden, S.72 ff; s.a. DOMBROWSKI, E., Einführung, S.61 ff; ein Lösungsschematismus für vermaschte Schaltungen findet sich bei MESSERSCHMIDT-BÜLKOW-BLOHM, Tech.Zuv., S.50 ff; BAZOVSKY, I., Reliability, S.121 ff

84) BORTFELDT, O., Methoden, S.69

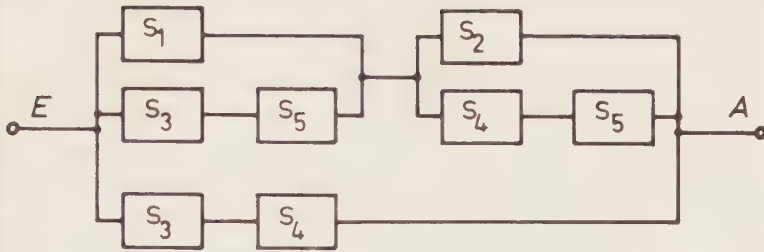


Abb.14: logisches Äquivalent zu den Abbn.12,13

In beiden abgeleiteten Strukturdiagrammen kommen nur triviale Reihen- und Serienschaltungen vor.

Eine Zusammenstellung der Reduktionen häufig vorkommender vernetzter Schaltungen findet man bei SCHNITZLER-SCHÜRGER-SCHWEIZER.⁸⁵⁾

3.4.4. Sicherheitsanalyse

Das bisher zugrunde gelegte Systemzuverlässigkeitsmodell bedarf insofern einer Ergänzung, als es das System ausschließlich in dem binären Zustandsraum "Systemzweck erfüllt - Systemzweck nicht erfüllt" betrachtet. Für die Praxis ist es oft aber besonders instruktiv, daß der Zustand "Systemzweck nicht erfüllt" näher aufgeschlüsselt wird, sodaß erkennbar wird, in welchen Fällen mit Katastrophen, erheblichen Werteeinbußen oder nur mit vergleichsweise harmlosen Beeinträchtigungen zu rechnen ist.⁸⁶⁾ Die in den Jahren nach 1950 entwickelte "Failure Mode and Effect Analysis", die mit nur je vier Gefahren- und Ereigniswahrscheinlichkeitsklassen arbeitete, erwies

85) SCHNITZLER-SCHÜRGER-SCHWEIZER, Flugregelungssyst., S.64

86) Allgemeiner Denkansatz bei HOLLIGER, H., Katastrophenanalyse, IO 40 (1971), S.201 ff

sich bei komplexen Systemen als zu ungenau und unübersichtlich.⁸⁷⁾ Vorzuziehen ist daher die "Fault Tree"-Methode, die auf einem dem dynamischen Programmieren vergleichbaren, rekursiven Denkansatz beruht. Ausgehend von dem abzuklärenden Gesamtereignis werden sämtliche Teilereignisse und deren Ereigniswahrscheinlichkeiten in einer Graphendarstellung ("Fault-Tree") miteinander verknüpft. Aus dem System von Elementen werden also einfachere Systeme von Ereignissen herausdestilliert, auf die dann die bekannten Verknüpfungsregeln der Wahrscheinlichkeitsrechnung angewendet werden können.⁸⁸⁾

-
- 87) DOSHAY, J., Predicting Design Adequacy for Mission Environment, in: Proc. 11th Nat. Symp. on Rel., S.1 ff; HARTMANN, W.L., Zuverlässigkeit, S.79 ff; verbessertes Verfahren bei GREENE, K.-CUNNINGHAM, T.J., Failure Mode, Effects, and Critically Analysis, in: Proc. 1968 Annual Symp. on Reliability, Boston 1968, S.374 ff
- 88) die bisher hierzu veröffentlichte Literatur ist spärlich. Vgl. z.B. EAGLE, K., Fault Tree and Reliability Analysis Comparisons, in: Proc. 1969 Annual Symp. on Reliability, Chicago 1969, S.12 ff; detailliertere Beschreibung bei BELL Telephone Laboratories, Method of Inadvertent Launch Analysis, Safety Study, Sec.VII, Vol.1, Sept 15, 1962; Hinweis bei HARTMANN, W.L., Kybernetik, S.319 ff; BALFANZ, H.P., Bestimmung von Ausfallraten und Ausfallarten mechanischer und elektrischer Bauteile..., QZ 17 (1972) 5 (zit. "Bestimmung"), S.96

4. Zuverlässigkeitseigenschaften der Systemelemente

Kennzeichnend für ein künstliches System ist, daß die Beziehungen zwischen seinen Elementen bewußt oder unbewußt vom Mensch gestaltet wurden. Auf Grund von Kenntnissen über bestimmte Eigenschaften der Elemente und über naturwissenschaftliche Gesetzmäßigkeiten ist der Mensch in der Lage, Wirkzusammenhänge zwischen Elementen gezielt herzustellen. Bei künstlichen Systemen ist also die innere Logik vollständig bekannt, zumindest insoweit, als sie auf einem bewußten Konzept beruht.

4.1. Systemausfälle durch technische Elemente

Besteht das System aus technischen Elementen, so ist Ausgangsbasis die Materie, und im Extremfall kann die Herstellung gezielter Wirkzusammenhänge bereits im atomaren Bereich beginnen⁸⁹⁾, ohne daß der analytische Zusammenhang verloren geht.

Bezogen auf die Zuverlässigkeitstheorie bedeutet dies, daß vom Ausfallverhalten sehr einfach strukturierter Basiselemente quantitativ auf die Gesamtzuverlässigkeit aller aus ihnen aufgebauten Systeme geschlossen werden kann.

An technischen Elementen ist über ihre Gesamtlebensdauer ein charakteristisches Ausfallverhalten zu beobachten.

Bei Inbetriebnahme findet man eine erhöhte Ausfallträchtigkeit, die auf Schwachstellen zurückzuführen ist, rasch abnimmt und in eine Phase mit konstanter Neigung zu Aus-

89) z.B. Integrierte Schaltkreise: ein monolithischer Siliziumhalbleiterkristall von wenigen mm³ Volumen wird durch Impfen mit Fremdatomen in Zonen mit Transistor-, Widerstands- und Kondensatorcharakter eingeteilt.

fällen mündet. Hieran anschließend lassen Alterungs- und Verschleißprozesse die Ausfallrate wieder ansteigen.⁹⁰⁾ Man kann also eine Charakteristik entsprechend Abb.15 beobachten. Wegen des typischen Verlaufs der Ausfallrate findet man gelegentlich die Bezeichnung "Badewannenkurve".

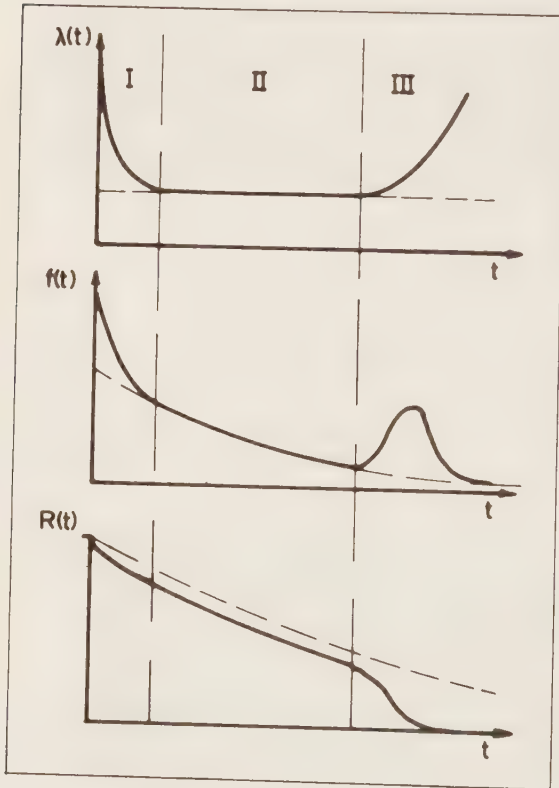


Abb.15: Mischverteilung⁹¹⁾

90) vereinzelt fehlt die Verschleißphase z.B. bei einigen elektronischen Bauteilen.

91) vgl. z.B. WONG, K.L., Rel.Math., S.19; HUMMITZSCH, P., Zuverlässigkeit, S.42

In Phase I sind Frühausfälle (WEIBULL-Verteilung) dominierend, während in Phase II - der eigentlichen Nutzungsphase, da immer versucht wird, die Ausfälle der Phase I durch Probelaufe des Systems auszumerzen - Zufallsausfälle (Exponentialverteilung) vorherrschen. Phase III ist gekennzeichnet durch Verschleiß- und Alterungsausfälle (Normalverteilung). Alle drei Phasen können auch ausschließlich durch die WEIBULL-Verteilung approximiert werden, wenn ihre festen Parameter geeignet gewählt werden. Der Funktionsverlauf in Abb.15 kann mathematisch geschlossen formuliert werden als Summenfunktion (Mischverteilung) der Phasenfunktionen, wobei die Bedingung (7) dadurch erhalten bleibt, daß jede Phasenfunktion mit ihrem Anteil an der Gesamtfunktion gewichtet wird.⁹²⁾

$$(51) \quad f(t) = a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t) + a_3 f_3(t)$$

$$(52) \quad 1 = a_1 + a_2 + a_3$$

Im Zuverlässigkeitsschrifttum liegen tabellarische Aufstellungen von Meßergebnissen in Abhängigkeit von den verschiedensten Beanspruchungsarten und Umsystembedingungen für technische Elemente sowie eingehendere Darstellungen ihrer Ermittlungsmethodik vor, entsprechend der Interessenlage der die Forschung tragenden Industrie jedoch vorwiegend für elektronische Bauteile.⁹³⁾

92) WONG, K.L., Rel.Math., S.19; GNEDENKO-BELJAJEW-SOLOWJEW, Zuverlässigkeitstheorie I, S.19 ff; auch REDEKER, G., Methodenwahl, S.48.

93) CONNOR, J.A., Reliability Prediction, in: MYERS-WONG-GORDY, Rel.Engineering, S.81 ff; ebenda, MYERS, R.H., Reliability Testing, S.175 ff; DELLINGER, D.C., Selecting Reliability Test Plans, in: IRESON, W.G., Handbook, S.3-1 ff; GNEDENKO-BELJAJEW-SOLOWJEW, Zuverlässigkeitstheorie II; BAZOVSKY, I., Reliability, S.208 ff; DOMBROWSKI, E., Einführung, Kap.3-7; Proc. Annual Symp.on Rel., Sessions: Environmental Testing, Parts and Components, Test and Demonstration, Math and Prediction Techniques.

4.2. Systemausfälle durch menschliches Fehlverhalten

Für den Betriebswirt ist von besonderem Interesse, ob überhaupt und inwieweit sich auch das Zuverlässigkeitsverhalten des Menschen in gleicher Weise wie bei technischen Elementen quantifizieren läßt, da in betriebswirtschaftlichen Systemen der Mensch als Element immer eine mehr oder weniger bedeutende Rolle spielt, und im übrigen bei genügender Erweiterung des Blickwinkels auch alle rein technischen Systeme erst im Zusammenwirken mit dem Menschen die eigentlichen Systemziele verwirklichen.

So bildet ein Auto erst zusammen mit dem Fahrer ein Transportsystem, genauso wie selbst vollautomatische Produktionssysteme den Mensch als Überwachungsorgan oder als dispositiven Faktor benötigen. Demzufolge führt eine umfassende Systemanalyse immer auf die Typen Mensch-Maschine- oder Mensch-Menschsystem. Wenn daher nach der Zuverlässigkeit des Transportsystems "Auto" oder allgemein nach der eines Produktionssystems gefragt wird, ist es falsch, nur den maschinellen Teil des Systems zu betrachten, wie es meist geschieht.⁹⁴⁾ Die Zuverlässigkeit, mit der menschliche Systembeiträge erbracht werden, geht offensichtlich mathematisch genauso in die Systemzuverlässigkeit ein, wie das Ausfallverhalten technischer Elemente.

Aus der Multiplikationsregel für logisch in Serie geschaltete Elemente folgt, daß die Zuverlässigkeit eines Systems geringer ist als diejenige des schwächsten Elements. Geht man demnach von einem seriellen System technischer Elemente aus, das vom Menschen bedient werden muß, so ist selbst bei theoretisch gegebener absoluter Zuver-

94) Bereits 1958 weist als einer der ersten auf diese Notwendigkeit hin WILLIAMS, H.L., Reliability Evaluation of the Human Component in Man-Machine Systems, Electrical Manufacturing (1958) 4, S.78 ff

lässigkeit der maschinellen Ausrüstung das System in dem Maße unzuverlässig, wie der Mensch nicht in der Lage ist, die von ihm geforderten, ergänzenden Vorrichtungen fehlerfrei zu leisten.⁹⁵⁾ Allein durch die Unzuverlässigkeit des Systemelementes Mensch kann daher der gesamte Systemzweck in Frage gestellt sein.

So gesehen sind solche Systemausfälle Konstruktionsfehler, die zu Lasten der Konstrukteure des Systems gehen, da diese die Systemrollen der Elemente determinieren, und nur sie die Möglichkeit haben, das System grundlegend zu verändern. Von daher gesehen hilft es wenig, die Verantwortung für Systemausfälle etwa unter dem Stichwort "fahrlässiges Verhalten" auf Elemente des Systems zu übertragen. Fahrlässigkeit ist ein menschliches Spezifikum und muß wie jede andere das System beeinflussende Eigenschaft eines Elements in den Systementwurf mit einbezogen werden.

Bleiben bestimmte Ausfallerscheinungen konstruktiv unberücksichtigt, so muß geprüft werden, ob in der Gesamtschau des Systems einschließlich seiner Beziehungen zu den Umsystemen die daraus folgenden Konsequenzen verantwortet werden können (vgl. Sicherheitsanalyse, Kap.3.4.4.).⁹⁶⁾

95) Der Anteil der Systemausfälle durch menschliches Fehlverhalten liegt nach Beobachtungen von COOPER bei 20-80 % aller festgestellten Systemausfälle, COOPER, J.I., Human-initiated Failures and Malfunction Reporting, IRE Transactions Human Factors Electron, vol. HFE, Sept. 1961, S. 104 f

96) Dieser Sachverhalt läßt sich verdeutlichen am Beispiel des Transportsystems "KFZ-Verkehr". Menschliches Fehlverhalten im Systemzusammenhang hatte in den ersten 10 Monaten des Jahres 1972 etwa 15.000 Tote und 441.000 Verletzte zur Folge. Das System fordert demnach vom Verkehrsteilnehmer Systembeiträge, die er offensichtlich im Durchschnitt nicht mit ausreichender Zuverlässigkeit zu leisten imstande ist. Nimmt man einmal an, daß dieses System noch nicht existiert und daß zur Durchführung wichtiger Transportaufgaben ein System neu geschaffen werden soll, dann müßte eine gründliche Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanalyse die Größenordnung dieser Verluste ermitteln können. Für die Konstrukteure ist die Entscheidung dann ein Problem der Güterabwägung.

Den Menschen für Fehlleistungen innerhalb eines Systems, an dem er zwangsläufig beteiligt ist, zu bestrafen, verlagert diese Verantwortung und geht am Kern des Problems vorbei.⁹⁷⁾

Im Gegensatz zu den in Kap. 4.1. beschriebenen künstlichen Systemen aus technischen Elementen ist bei Mensch-Maschine oder Mensch-Mensch-Systemen bereits ein Teil der Basiselemente von äußerster Komplexität. Der Mensch selbst, als System betrachtet, ist sogar noch erheblich komplexer als jedes bisher konzipierte künstliche System. Nach dem bisherigen Kenntnisstand ist daher eine Auflösung des Menschen in Subsysteme, deren Interdependenzen derart bekannt wären, daß von ihren Eigenschaften auf das Verhalten des Gesamtsystems vollständig geschlossen werden könnte, nur innerhalb sehr enger Grenzen möglich.

Das systematische, unter den Stichworten "Arbeitswissenschaft" oder "Human Factors Engineering" betriebene Studium der menschlichen Systembeiträge hat dennoch gezeigt, daß sich diese prinzipiell ähnlich denen der technischen Elemente quantifizieren lassen, sind sie hinreichend einfach strukturiert sogar innerhalb bemerkenswert enger Grenzen.⁹⁸⁾

-
- 97) vgl. hierzu jedoch die Rolle der Strafdrohung als zuverlässigkeitsbeeinflussende Methode, Kap. 5.7.
98) Einführend mit weiteren Quellenhinweisen: LEHMANN, G., Praktische Arbeitsphysiologie, 2. Aufl., Stuttgart 1962 (zit. "Arbeitsphys."); STEGEMANN, J., Leistungsphysiologie - Physiologische Grundlagen der Arbeit und des Sports, Stuttgart 1971 (zit. "Leistungsphys."); HILF, H.H., Arbeitswissenschaft, München 1957; MCCORMICK, E.J., Human Factors Engineering, 2. ed., New York 1964 (zit. "Human Factors"); FOGEL, L.J., Biotechnology: Concepts and Applications, Englewood Cliffs, N.J. 1963 (zit. "Biotechn."); SINAÏKO, H.W. (ed.), Selected Papers on Human Factors in the Design and Use of Control Systems, New York 1961 (zit. "Papers").

Die Forschung ist nahezu ausschließlich bei der Ermittlung und Quantifizierung von systemrelevanten Eigenschaften des Menschen auf die Black-box-Methode⁹⁹⁾ angewiesen, bei der die Input-Outputrelationen ohne die vollständigen inneren Wirkzusammenhänge zu kennen, geklärt werden können. Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Black-box-Methode ist zunächst nur, daß sich die Systembeiträge einwandfrei definieren lassen, eine Forderung, die für motorische und einfache informatorische Rollen, wie z.B. Ablesen von Instrumenten, Bedienen von Schaltern, ohne weiteres lösbar ist.¹⁰⁰⁾

Bei den höheren menschlichen Fähigkeiten, wie Erkenntnis, Entscheidung, Innovation usw., liegen dagegen noch keine vergleichbar überzeugenden Ergebnisse vor. Sie erscheinen möglich, sofern die Systembeiträge so strukturiert sind, daß ihr Informationsinhalt bereits durch ihre Struktur deutlich vorgezeichnet ist. Im Gegensatz dazu stößt man bei unstrukturierten Beiträgen, deren Leistung größere Anforderungen an die Kreativität stellen, auf bisher unüberwindliche Schwierigkeiten. Es läßt sich jedoch nicht schlüssig nachweisen, daß diese prinzipiell nicht überwunden werden können, oder wo eine Grenze zu ziehen wäre.

Dieses zumindest gegenwärtig noch bestehende Unvermögen wiegt jedoch hier weniger schwer, als man erwarten sollte. Aus dem System "Unternehmung" lassen sich immer Subsysteme herauslösen, bei denen die Anforderungen an schwer zu erfassende, höhere menschliche Fähigkeiten nur eine relativ untergeordnete Rolle spielen. Häufig ist diese

99) vgl. z.B. ULRICH, H., Unternehmung, S.132

100) z.B. KENNEDY, J. et al., Handbook of Human Engineering, Data for Design Engineers, Medford 1952; WOODSON, W.E., Human Engineering Guide for Equipment Designers, Berkeley 1954; s.a. Zeitschrift: Human Factors.

Bedingung sogar für den größeren Teil der in einer Unternehmung anfallenden Verrichtungen erfüllt, Abb.16 (schraffierter Bereich).

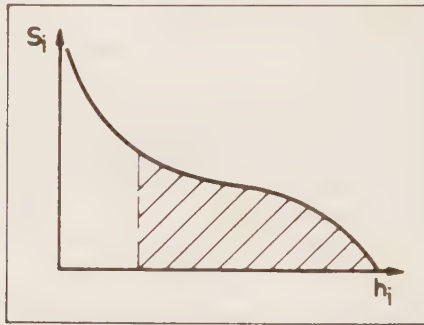


Abb.16: Häufigkeitsverteilung der Schwierigkeitsgrade S_i aller Arbeitsverrichtungen in der Unternehmung h_i (nach GUTENBERG)¹⁰¹⁾

Sehr vorteilhaft für das Bemühen, die Zuverlässigkeit menschlicher Systembeiträge zu quantifizieren, ist, daß schon früh erkannt wurde, daß aus der Häufigkeit auftretender Irrtümer und Unfälle Rückschlüsse auf psychologische und physiologische Gesetzmäßigkeiten gezogen werden können. Es ist deshalb aus anderem Anlaß bereits Datenmaterial zum menschlichen Ausfallverhalten in der Literatur veröffentlicht worden. In Umkehrung seines ursprünglichen Zwecks, nämlich als Grundlage für quantitative Zuverlässigkeitsangaben in Abhängigkeit physiologischer und psychologischer Gegebenheiten, kann dieses Material im Sinne der vorliegenden Arbeit verwertet werden.

101) GUTENBERG, E., Prod., S.12

Vergleicht man die Forschungsergebnisse mit dem Zuverlässigkeitsverhalten technischer Elemente in Abhängigkeit von denselben Einflußparametern, so findet man in vieler Hinsicht bemerkenswerte Parallelen. So ergibt sich z.B., daß die in Kap. 4.1. abgeleitete Mischverteilung (Abb.15) auch auf den Menschen anwendbar ist, wenn Phase I als Lern- oder Einarbeitungsprozess, Phase II als eigentliche Nutzphase und Phase III als Ermüdungs- oder Alterungsprozeß verstanden werden.

Die folgenden Abschnitte zeigen, daß zuverlässigkeitstheoretisch eine formale Gleichbehandlung aller Systemelemente möglich ist. Wenn dabei physiologische Betrachtungen im Vordergrund stehen, bedeutet dies insofern keinen Rückfall in das "Scientific Management" TAYLORscher Prägung, als zunächst die objektiven Bedingungen zuverlässiger Beitragsleistung des Menschen geklärt sein müssen, bevor man sich den subjektiven Bedingungen zuwenden kann.¹⁰²⁾

4.2.1. Totalausfälle des Menschen

Auf Grund seiner besonderen Eigenschaften und seiner unabdingbaren Ansprüche als Individuum steht der Mensch für ein System nicht ununterbrochen zur Verfügung. Sofern es nur um die hieraus folgenden Ausfälle geht, hat man es zuverlässigkeitstheoretisch mit einem verhältnismäßig leicht zu erfassenden Sachverhalt zu tun, da das Nichtleisten des geforderten Systembeitrags einfach Folge der Abwesenheit des Stelleninhabers ist, mithin sich nicht die Frage nach den zulässigen Beitragstoleranzen stellt. Die Abwesenheit als solche ist hinreichendes Indiz für den Elementeausfall.

102) Hinsichtlich der Unterscheidung von objektiven und subjektiven Bedingungen menschlicher Arbeitsleistung vgl. GUTENBERG, E., Prod., S.11 ff

Vollkommen problemlos sind die Ausfallzeiten, die auf Grund von Arbeitsverträgen von vornherein festliegen. Diese Elementeeigenschaft, die den Bedürfnissen Frühstück, Mittagessen, Freizeit, Schlaf und Urlaub Rechnung trägt, ist einwandfrei durch Arbeitsverträge quantifiziert. Für den Normalarbeitstag hat $R(t)$ den Sprungfunktionsverlauf Abb.17.

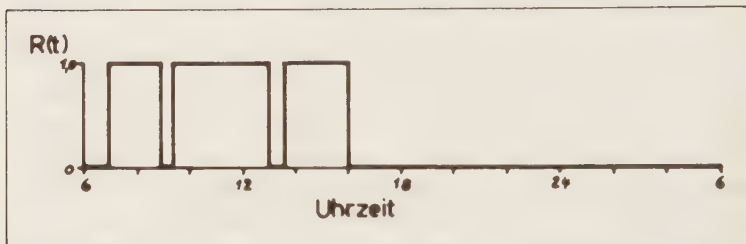


Abb.17: Zuverlässigkeitsverlauf auf Grund vertraglicher Bindung

Wird das System durch diese Ausfallzeiten im Sinne des Systemzwecks unzuverlässig, so müssen durch andere Personen diese Ausfallzeiten ausgefüllt werden (Schichtbetrieb, vgl. kalte Redundanz, Kap. 3.4.2.2.).

Über die Zuverlässigkeit auf Grund anderer Totalausfallursachen ist wiederum nur statistisch eine quantitative Aussage möglich.

Die Sprungfunktion Abb.17 erfährt zusätzliche Sprünge auf den Wert 0 durch die Wahrnehmung persönlicher Bedürfnisse während der Arbeitszeit, in erster Linie durch den Gang zur Toilette. Unter der (nicht geprüften) Annahme einer konstanten Bedürfniswahrnehmungsquote kann

man davon ausgehen, daß immer der gleiche Prozentsatz der Elemente während der Arbeitszeit seinen Systembeitrag durch Abwesenheit nicht leisten kann.

Die Ermittlung von genauen Wahrscheinlichkeitsverteilungen hinsichtlich Ereignis und zeitlicher Länge ist zumindest theoretisch problemlos.

Zweite wichtige statistische Totalausfallursache ist Arbeitsunfähigkeit wegen Krankheit. Über diese menschlichen Totalausfälle haben Versicherungen und Krankenkassen bereits Unterlagen im Laufe der Jahre aus versicherungsmathematischen Gründen gesammelt, aus denen aufgeschlüsselt nach Geschlecht, Alter, Jahreszeit, Berufssparten und anderen Einflußgrößen die Größenordnung der im konkreten Fall zu erwartenden Krankheitswahrscheinlichkeit ermittelt werden kann. Der von den Krankenkassen allmonatlich veröffentlichte Krankenstand,¹⁰³⁾ d.h. das Verhältnis von Kranken zu den Beschäftigten pro Kalendertag, kann z.B. direkt als Maß für die Ausfall-dichte $f(t)$ genommen werden. Die Zahlen für das Jahr 1971 zeigen, daß der Krankenstand das ganze Jahr über deutlich unter 10 % liegt und daß er - wie zu erwarten - saisonal variiert, Abb. 18.

In Abb.18 ist weiterhin erkennbar, daß für die einzelnen Berufssparten teilweise erheblich voneinander abweichende Werte gefunden werden. Da auch die anderen oben angeführten Einflußgrößen mitunter sehr wesentlich den Krankenstand beeinflussen,¹⁰⁴⁾ sollten zur Ermittlung der menschlichen Unzuverlässigkeit durch Krankheit möglichst detaillierte Unterlagen zur Verfügung stehen.

103) z.B. in: "Die Betriebskrankenkasse", Zeitschrift des Bundesverbandes der Betriebskrankenkassen, Essen

104) vgl. hierzu SPIEGELHALTER, F., -SCHNABEL, F., Die Struktur des Krankenstandes in der Industrie, Der Arbeitgeber 14 (1962), S.302 ff

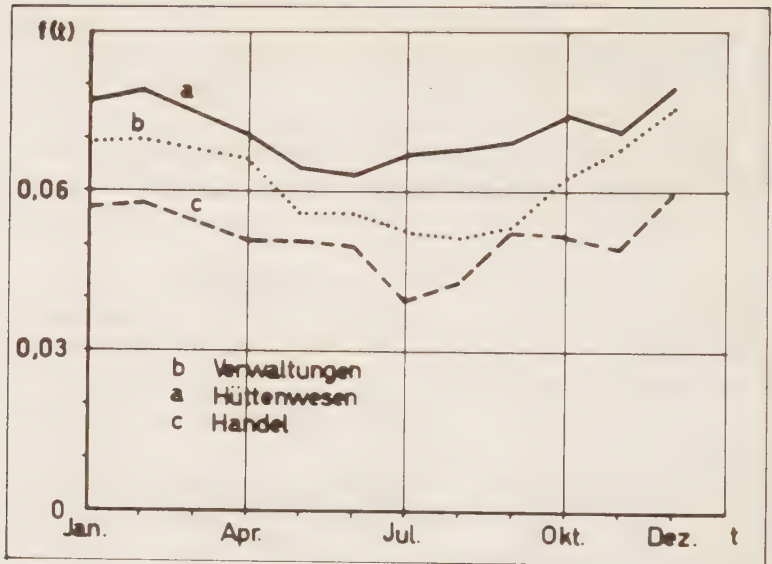


Abb.18: Entwicklung der Ausfalldichte $f(t)$ durch Krankheit im Jahre 1971 (nach monatlichen Angaben in "Die Betriebskrankenkasse")

Bei der Betrachtung menschlicher Totalausfälle durch Tod fällt die formale Identität zwischen der Mischverteilung in Kap. 4.1., Gl.51 und dem Verlauf der Sterbewahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Lebensalter auf, Abb.19. Der Berechnung der Sterbewahrscheinlichkeit liegen empirisch gewonnene Sterbeziffern zugrunde. Sie ist definiert als die Wahrscheinlichkeit q_x der Personen im Alter von x Jahren bis zum Alter von $(x + 1)$ Jahren zu sterben;¹⁰⁵⁾ q_x ist somit das diskrete Analogon zur Ausfallrate.¹⁰⁶⁾

105) KUCHENBECKER, H., Grundzüge der Wirtschaftsstatistik, Herne-Berlin 1970, S.47 f

106) Genauer Ausfallquote, vgl. Def. in Kap. 3.2.

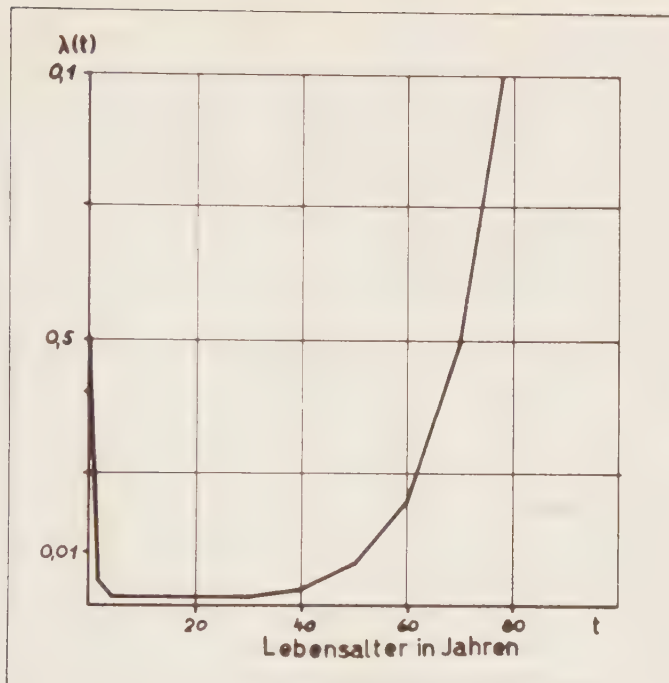


Abb.19: Sterbewahrscheinlichkeiten $q_x = \lambda(t)$ für die BRD 1960/62¹⁰⁷⁾

Der relativ hohen Ausfallrate im Säuglingsstadium, hauptsächlich verursacht durch angeborene, konstitutionelle Schwäche (Frühausfälle), folgt eine Phase mit über längere Zeit konstanter Ausfallrate. Hier handelt es sich im wesentlichen um zufallsbedingte Todesursachen wie Unfälle und ausgefallene Krankheiten. Mit fortschreitender Lebensdauer nimmt dann die Ausfallrate entsprechend dem einsetzenden Alterungsprozess wieder zu (Verschleißausfälle).

107) KUCHENBECKER, H., Grundzüge der Wirtschaftsstatistik, Herne-Berlin 1970, S.48

4.2.2. Der Irrtum als spezifisch menschliche Ausfallart

Die Verknüpfung des Menschen mit den übrigen Systemelementen findet über Reize (Inputs) und äußere Reaktionen (Outputs) statt.¹⁰⁸⁾ Das menschliche Verhalten innerhalb eines Systems kann demnach aufgefaßt werden als die Verkettung der drei Parameter

Reiz(S) → innere Reakt.(O) → äußere Reakt.(R)

wobei komplexes Verhalten als ein Geflecht solcher (S - O - R)-Ketten zu verstehen ist.¹⁰⁹⁾

Ein Irrtum liegt dann vor, wenn durch Störungen innerhalb dieser Ketten der systemadäquate Leistungsbeitrag des Menschen ausbleibt. Die Adäquanz der äußeren Reaktion auf den Reiz hin wird durch Rückmeldung des Reaktionseffektes im Rahmen des Informationsgehaltes der Rückmeldesignale und der Wahrnehmungsfähigkeit menschlicher Sensoren geregelt.¹¹⁰⁾ Diese Regelkreisschaltung bei der Leistung menschlicher Systembeiträge, die ständig und unwillkürlich jeden Reaktionseffekt mit sämtlichen vorgegebenen Normgrößen, Erfahrungen und Wertvorstellungen vergleicht, hat zur Folge, daß selbst ein schwerwiegender Irrtum nicht ohne weiteres den Systemzweck beeinträchtigt, d.h. ein Irrtum kann nicht unmittelbar dem Ausfall eines maschinellen Systemelementes gleichgesetzt werden. Läßt es nämlich das System zu - und dies ist meist der Fall -, daß mehrfach versucht werden kann, den erforderlichen Systembeitrag zu leisten,

108) vgl. WIENER, N., Mensch und Menschmaschine, Frankfurt-Bonn 1966 (zit. "Mensch"), S.21 ff

109) MEISTER, D., Human Factors in Reliability (zit. "Human Rel."), in: IRESON, W.G., Handbook, S.12-4 f; KLIS, M., Überzeugung und Manipulation, Wiesbaden 1970 (zit. "Überzeugung"), S.38 ff

110) WIENER, N., Mensch, S.21 ff

so kann erst dann von einem Ausfall gesprochen werden, wenn nach Ablauf einer bestimmten Zeit oder einer bestimmten Anzahl zulässiger Versuche, dieser nicht erbracht worden ist. Soweit also das System Korrekturen zuläßt, besteht eine starke Tendenz, Irrtümer durch Wiederholung oder Verbesserung auszugleichen.

Aus diesem Grunde erweitert MEISTER in bezug auf den Menschen die allgemeine Definition der Zuverlässigkeit, indem der erforderliche Systembeitrag innerhalb einer bestimmten Minimalzeit geleistet werden muß.¹¹¹⁾ Zuverlässige Aufgabenbewältigung ist also nicht identisch mit irrtumsfreier Durchführung.

Irrtümer können aus zwei Komponenten zusammengesetzt gedacht werden.¹¹²⁾ Als konstanter Irrtum ϵ wird dabei die durchschnittliche Abweichung vom angestrebten Toleranzbereich bezeichnet. Konstante Irrtümer addieren sich linear $\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 + \dots$

Sie bereiten deshalb zuverlässigkeitstheoretisch keine Schwierigkeiten, da der konstante Irrtum ϵ_1 durch eine Vorrichtung, die gleichzeitig den konstanten Irrtum

$\epsilon_2 = -\epsilon_1$ erzeugt, ohne weiteres kompensiert werden kann.

Von Interesse ist hier nur der variable Irrtum σ , die Streuung des Systembeitrags um den angestrebten Wert.

Bei variablen Irrtümern addieren sich deren Quadrate

$$\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \dots$$

111) MEISTER, D., Human Rel., S.12-21: "We define human reliability as the probability that a job or task will be successfully completed by personnel at any required stage in system operation within an required minimum time (if the time requirement exists)."

112) vgl. CHAPANIS, A., Theory and Methods for Analysing Errors in Man-Machine Systems, in: SINAÏKO, H.W., Papers, S.44 ff

Hieraus folgt, daß die Gesamtstreuung stärker vermindert wird, wenn von den Teilvarianzen jeweils die größere reduziert wird.

Die Identifikation eines Irrtums ist ebenfalls an die Voraussetzung geknüpft, daß die Toleranzgrenzen exakt definiert sind, mit denen jeder Systembeitrag verglichen werden kann, so daß erkennbar ist, ob er noch innerhalb des zulässigen Bereichs liegt.

Die einfachere, oft die einzig praktikierbare Methode, menschliches Irrtumsverhalten quantitativ in eine Systemzuverlässigkeitsanalyse einzubeziehen, geht den folgenden Weg:

- Definition des Systembeitrags einer Person und Aufteilung in einfache Teilleistungen
- Direkte Beobachtung der Irrtumsquoten bei der Durchführung der Teilleistungen
- Kombination dieser Irrtumsquoten zu einer Gesamtirrtumsquote.

Die mathematisch elegantere und langfristig auch überzeugendere Methode bildet wie in Kap. 4.1. aus Fehlerbeobachtungen ein kontinuierliches Verteilungsmodell,¹¹³⁾ aus dem dann die Zuverlässigkeit für jede Aktivitätsdauer abgeleitet werden kann.

Analog zur Ausfallrate $\lambda(t)$ wird dann eine Irrtumsrate $e(t)$ gebildet.

$$(55) \quad R(t) = \exp \left(- \int_0^t e(t') dt' \right)$$

¹¹³⁾ REGULINSKI, T.L.-ASKREN, W.B., Mathematical Modeling of Human Performance Reliability, in: Proc. 1969 Annual Symp. on Reliability, Chicago 1969

4.2.3. Einflußparameter menschlicher Systemzuverlässigkeit

Abgesehen von den biologisch notwendigen Totalausfällen wirken zusätzlich zahlreiche Einflußparameter auf die Fähigkeit des Menschen, Systembeiträge kontinuierlich leisten zu können, ein. Die Vermutung, daß mit diesen Leistungsschwankungen die Neigung zu Fehlverhalten (Ausfallrate) reziprok korreliert, ist, wie bereits angedeutet, nachweisbar.

An erster Stelle ist in diesem Zusammenhang die Ermüdbarkeit des menschlichen Organismus zu nennen, die in Abhängigkeit von Belastungsart, -intensität und -dauer die Leistungsfähigkeit reversibel vermindert. Sie kann durch Einschalten angemessener Pausen wieder rückgängig gemacht werden, wobei der Erholungswert einer Pause exponentiell mit ihrer Dauer abnimmt.¹¹⁴⁾ Wesentlich ist, daß geistige Beanspruchung langsamer ermüdet als körperliche, umgekehrt erfordert die Wiederherstellung der Ausgangsleistungsfähigkeit bei geistiger Belastung erheblich längere Erholungspausen (Abb.20).

Unabhängig von ermüdungsbedingten Leistungsschwankungen unterliegt der menschliche Organismus periodischen Einflüssen, die seine generelle Leistungsfähigkeit und -bereitschaft beeinträchtigen. Mit bemerkenswert guter Übereinstimmung sind interindividuell Tages-, Wochen- und Jahresschwankungen nachweisbar.

114) GRAF, O., Arbeitszeit und Arbeitspause (zit. "Arbeitszeit"), in: MAYER, A.-HERWIG, B., Betriebspsychologie, Bd.9 von "Handbuch der Psychologie", Göttingen 1961, S.99 ff; LEHMANN, G., Arbeitsphys., S.241

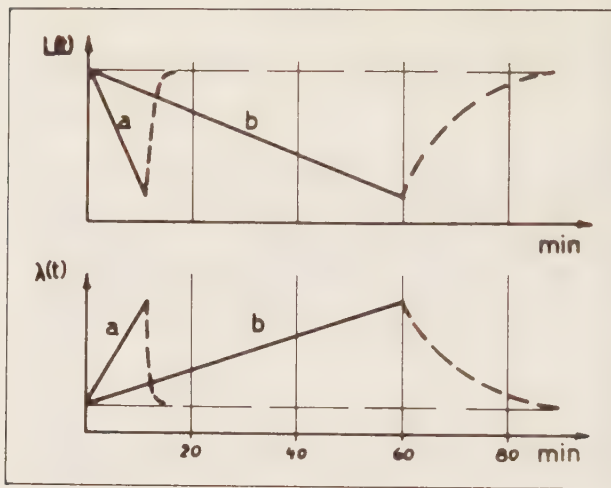


Abb. 20: Absinken der Leistungsfähigkeit $L(t)$ unter Belastung mit anschließender Erholung¹¹⁵⁾ und schematischer Verlauf der Ausfallrate (a Fahrradergometer, b Kopfrechnen)

Die im Tagesablauf zu beobachtende physiologische Leistungsbereitschaftskurve ist gekennzeichnet durch eine günstige Leistungsdisposition sowohl für körperliche wie geistige Beanspruchungen zwischen 9 und 10 Uhr vormittags. Ein zweites meist weniger ausgeprägtes Maximum folgt gegen 18 Uhr, dazwischen liegt um die Mittagszeit im Bereich 14 bis 15 Uhr ein deutliches Leistungsminimum. Das besondere Leistungstief nachts gegen 3 Uhr zeigt, daß vom Standpunkt der optimalen Nutzung der Systemelemente Nacharbeit nach Möglichkeit vermieden werden sollte, daß es vielmehr sinnvoll ist, dieses Leistungstief in die zur Erhaltung der Leistungsfähigkeit erforderliche Schlafpause von 8 Stunden im 24 Stundenrhythmus zu verlegen. Diese zeitlichen Abhängigkeiten

¹¹⁵⁾ nach ARNOLD zit. nach LEHMANN, G., Arbeitsphys., S. 49: Maß für den Grad der allgemeinen Ermüdung ist hier die Fähigkeit aufeinanderfolgende Lichtblitze als einzelne unterscheiden zu können (optische Verschmelzungsfrequenz).

erweisen sich als außerordentlich stabil, und sie ändern ihren grundsätzlichen Charakter auch nicht durch jahrelanges Nachtschichtarbeiten.¹¹⁶⁾ BJERNER-HOLM-SWENSSON¹¹⁷⁾ haben die Existenz der physiologischen Leistungsbereitschaftskurve mit beobachteten Fehlerhäufigkeiten beim Ablesen und Notieren von Messwerten nachgewiesen, Abb.21. Daraus folgt umgekehrt, daß die Irrtumswahrscheinlichkeit eine Funktion der Tageszeit ist.

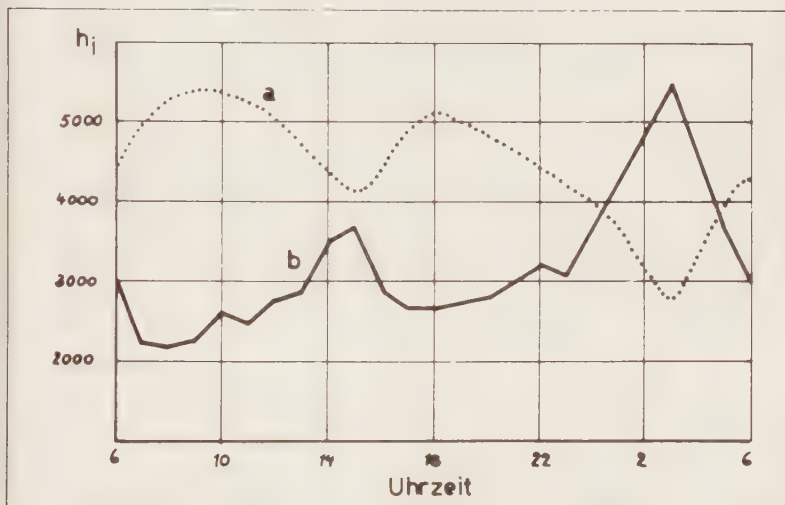


Abb.21: Kurve der physiologischen Leistungsbereitschaft und beobachtete Fehlerhäufigkeiten h_i nach BJERNER-HOLM-SWENSSON als Funktion der Tageszeit (a Physiolog. Leistungsbereitschaft, b Fehlerhäufigkeit)

116) LEHMANN, G., Arbeitsphys., S.110 f; vgl. auch GUTENBERG, E., Prod., S.37; ULICH, E., Periodische Einflüsse auf die Arbeit (zit. "Einflüsse"), in: MAYERHERWIG, Betriebspsych., S.131

117) zit. nach LEHMANN, G., Arbeitsphys., S.113: Fehlanweisungen von Gasanstaltsarbeitern beim Ablesen von Gaszählern (Gesamtpopulation 175.000 Anschr.)

In Abb. 21 fällt auf, daß die "Badewannencharakteristik" von Kap. 4.1. während eines Tages zweimal auftritt. Tatsächlich ist auch die morgendliche und frührnachtsmittägliche Anlaufkurve mit einem kurzfristigen Lernprozeß vergleichbar, und ein sich anschließender Ermüdungsvorgang hat vorübergehend auf die Irrtumsrate den gleichen Einfluß wie ein Alterungsprozeß.

Neben der tageszeitlichen Rhythmik sind jahreszeitliche Schwankungen in der Leistungsfähigkeit als Folge unterschiedlicher UV-Einstrahlung und Wetterverhältnisse ¹¹⁸⁾ wissenschaftlich gesichert. Auffällig ist hierbei ein deutliches Leistungsminimum im Monat August, Abb. 22 (nach VERNON ¹¹⁹⁾). Nach ANDLAUER ¹²⁰⁾ korrelieren die beobachteten Unfallhäufigkeiten hochsignifikant mit der gefundenen Leistungskurve, woraus allgemein auf eine korrelierende Ausfallrate geschlossen werden kann.

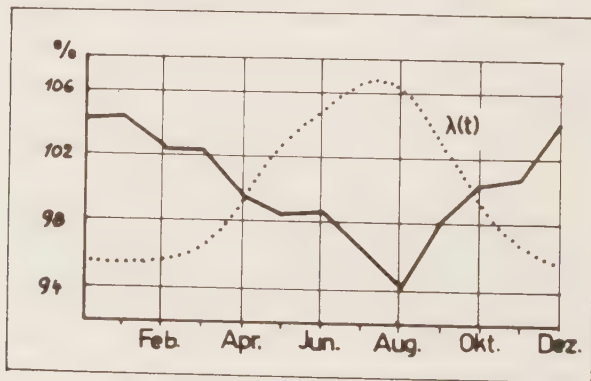


Abb. 22: Abhängigkeit der Arbeitsleistung von der Jahreszeit und schematischer Verlauf der Ausfallrate

118) de RUDDER, B., Grundriß einer Meteorobiologie des Menschen, 3. Aufl., Berlin-Göttingen-Heidelberg 1952
119) zit. nach ULICH, E., Einflüsse, S. 126
120) zit. ebenda, S. 125

Daneben bestehen Wochenschwankungen, deren Ursachen und qualitativer Verlauf allerdings umstritten sind.¹²¹⁾ Nach verbreiteter Auffassung ist der Mensch Montags unter dem Eindruck des gerade verbrachten Wochenendes besonders leistungsschwach und zu Fehlverhalten veranlagt, gleichwie er am Freitag angesichts der Lohnzahlung und des Wochenendes ebenfalls zu geringerer Leistung disponiert sein soll. Dieser Meinung stehen jedoch auch widersprechende Untersuchungsergebnisse gegenüber, die aber noch kein abschließendes Urteil erlauben, so daß dieses Problem einstweilen offengelassen werden muß.

Wenn in der Praxis in vielen Fällen gerade bei besonders guter Leistungsdisposition ein Ansteigen der Fehlerhäufigkeiten beobachtet werden kann, dann ist hierfür die Tendenz, während dieser Zeiten das Arbeitstempo zu steigern, ursächlich. Die hier erläuterten Abhängigkeiten sind daher nur bei standardisierten Arbeitsbedingungen zu beobachten.

Für den praktischen Entwurf eines zuverlässigen Systems bedeuten diese Ergebnisse, daß die geforderten Systembeiträge den Leistungsschwankungen angepaßt werden müssen, damit die Irrtumsrate möglichst klein bleibt. Konkret würden solche Anpassungen darin bestehen, daß im Hinblick auf Dauer und Häufigkeit gezielt Erholungspausen eingeschaltet werden, oder daß bei Fließfertigung die Fließgeschwindigkeit an den physiologischen Leistungsbereitschaftsrhythmus angepaßt wird.

Ohne technische Hilfsmittel ist der Mensch nur innerhalb sehr enger Bandbreiten physikalischer Umsystembe-

121) vgl. hierzu ULLICH, E., Einflüsse, S.127

dingungen existenzfähig. Darüberhinaus sprechen seine Rezeptoren (Sensoren), mit deren Hilfe er die Verbindung zu anderen Systemelementen aufnehmen kann, ebenfalls nur innerhalb bestimmter physikalischer Grenzen an.¹²²⁾ Wie an Hand einiger Beispiele gezeigt werden kann, ist der optimale Leistungsbereich innerhalb dieser ohnehin schon sehr engen Grenzen noch einmal nur ein sehr kleiner Teilausschnitt. Der menschliche Organismus reagiert in seiner Leistungsfähigkeit demnach sehr empfindlich auf mitunter kleinste Veränderungen im Umsystem. Die Ausfallrate korreliert auch hier mit den Leistungsfähigkeitskurven reziprok.

Besonders deutlich ist der Einfluß derjenigen Umsystemverhältnisse auf den Menschen, die unter dem Begriff "Klima" zusammengefaßt werden¹²³⁾. Wird als skalare Meßgröße für Klima die nicht vollständig beschreibende YAGLOUSche Effektivtemperatur T_{eff} ¹²⁴⁾ gewählt, so ergeben sich relative Leistungsabhängigkeiten entsprechend Abb.23, wobei nur ein Abfall in Richtung steigender Temperatur erkennbar ist, da bei fallenden Temperaturen zunächst eine Anpassung durch Kleidung erfolgt. Da der Organismus bei körperlicher Tätigkeit selbst Wärme produziert, führen bei überwiegend geistiger Tätigkeit erst höhere Temperaturen zu einem Leistungsabfall als bei körperlicher Arbeit.

-
- 122) vgl. hierzu im Einzelnen McCORMICK, E.J., Human Fact., Chapt.5: Human Information Process; Chapt.6: Information Displays; FOGEL, L.J., Biotechn., Sec.B: The Human Information Input Channels, S.61 ff
- 123) NESSWETHA, W., Bioklimatische Wirkungen auf die Arbeit, in: MAYER-HERWIG, Betriebspsych., S.118 ff
- 124) Die effektive Temperatur T_{eff} wird gebildet aus vier Klimaeinflußgrößen: Lufttemperatur, Luftfeuchte, Strahlung, Windgeschwindigkeit; Isothermen werden hierbei gebildet aus verschiedenen Meßwertkombinationen, die physiologisch als isotherm empfunden werden., vgl. WENZEL, H.G., Klimatische Arbeitsbedingungen (zit. "Klimat."), in: MAYER-HERWIG, Betriebspsych., S.140 ff

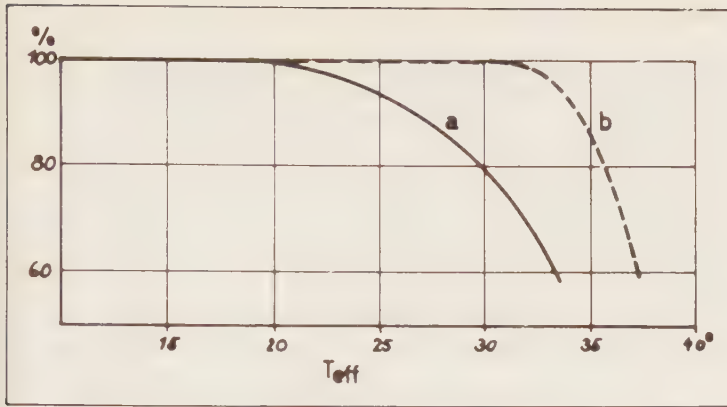


Abb.23: Relative Leistungsfähigkeit bei körperlicher (a) und geistiger (b) Belastung in Abhängigkeit von T_{eff} (nach WYNDHAM und LEHMANN)¹²⁵⁾

Mit den Werten in Abb.23 korrelieren die in Abb.24 dargestellten Fehlerhäufigkeitskurven einwandfrei. Obwohl hier erhebliche interindividuelle Unterschiede erkennbar sind, nimmt in allen drei Fällen bei derselben effektiven Temperatur (33 - 34°C) die Fehlerhäufigkeit charakteristisch zu.¹²⁶⁾

Für alle Einflußgrößen des Umsystems, wie z.B. toxische Gaskonzentrationen, Lichtintensitäten, Frequenzen, Geräuschpegel usw.¹²⁷⁾, lassen sich vergleichbare Abhängigkeiten nachweisen.

125) LEHMANN, G., Arbeitsphys., S.263 f

126) Selbstverständlich nimmt in Richtung sinkender Temperaturen die Fehlerhäufigkeit schließlich ebenfalls zu, so daß sich ein günstiger Bereich eingrenzen läßt., s. WENZEL, H.G., Klimat., S.159: Häufigkeit von Unfällen als Funktion der Lufttemperatur

127) vgl. hierzu McCORMICK, E.J., Human Fact., Chapt.15: Atmospheric Conditions, S.507 ff; LEHMANN, G., Arbeitsphys., S.297 ff, 313 ff

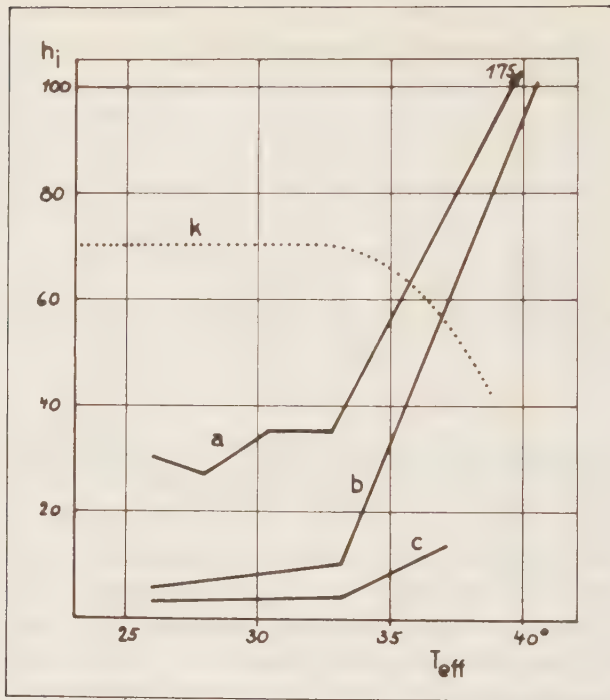


Abb.24: Mittlere Fehlerzahl pro Stunde h_i bei der Aufnahme von Funksprüchen in Abhängigkeit von der Effektivtemperatur (nach MACKWORTH)¹²⁸⁾ gemessen bei durchschnittlichen (a), guten (b), ausgezeichneten (c) Funkern (k Leistungsfähigkeit bei geistiger Arbeit)

Der Katalog der Einflußparameter auf die menschliche Zuverlässigkeit beschränkt sich jedoch keineswegs auf diese objektiven Bedingungen menschlicher Arbeitsleistung. GUTENBERG stellt ihnen subjektive Bedingungen gegenüber¹²⁹⁾, Einflußgrößen, die das interindividuell unter-

¹²⁸⁾ zit. nach LEHMANN, G., Arbeitsphys., S.265

¹²⁹⁾ GUTENBERG, E., Prod., S.14 ff

schiedliche Leistungspotential begründen. Die von ihm genannten fünf Bestimmungsfaktoren individueller Eigenschaft für bestimmte Systembeiträge sind in gleicher Weise auch ausschlaggebend für die individuelle Zuverlässigkeitsdisposition. Soweit es sich um einwandfrei abgrenzbare Größen wie Alter, Geschlecht usw. handelt, kann ihre Einwirkung auf die Zuverlässigkeit in der vorstehenden Weise analysiert werden. Da dies für den soziologisch-psychologischen Bereich weitgehend nicht gilt¹³⁰⁾, ist dieser Komplex nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung (s. Kap. 5.7.).

4.2.4. Größenordnungen menschlicher Zuverlässigkeit

Wird den Bedingungen menschlicher Zuverlässigkeit weitgehend Rechnung getragen, und beherrscht der Mensch den von ihm geforderten Systembeitrag einwandfrei, so können oft erstaunlich hohe Zuverlässigkeiten erwartet werden. ROOK¹³¹⁾ gibt z.B. folgende Minimalzuverlässigkeiten, die er bei der Montage elektronischer Geräte beobachtet hat, an:

	Zuverlässigkeit
Komponente vergessen	0,99997
Falsche Komp. eingesetzt	0,9998
Lötung vergessen	0,99995
Lötung ungenügend	0,998

Die außerordentlich hohen Zuverlässigkeiten bei den Beiträgen "Komponente vergessen" und "Lötung vergessen",

130) Erste Ansätze zumindest die Kommunikationsstruktur innerhalb der Unternehmung quantitativ zu erfassen bei MAG, W., Die quantitative Erfassung der Kommunikationsstruktur ..., ZfbF (1970), S.22 ff

131) ROOK, L.W., Reduction of Human Error in Industrial Production, zit. nach MEISTER, D., Human Rel., S.12-24

bei denen mit nur 3 bzw. 5 Ausfällen auf 100.000 Beiträge zu rechnen ist, machen deutlich, in wie starkem Umfang menschliche Zuverlässigkeit abhängig ist von der Intensität der Rückkopplungsreize, die ihn zur Korrektur seines Fehlverhaltens veranlassen. Demgegenüber tritt der Fehler "Lötung ungenügend" relativ häufig auf, weil dieser nur ein vergleichsweise schwaches Signal liefert¹³²⁾ und deshalb nur bei erheblich gesteigerter Aufmerksamkeit erkannt wird.

Bemerkenswert an den Ergebnissen ROOKs ist außerdem, daß die Zahl der tatsächlich vorkommenden Irrtumsarten innerhalb eines Systems sehr begrenzt ist, weshalb Zuverlässigkeitsanalysen selbst bei sehr komplexen Systemen im vernünftigen Rahmen bleiben. So kann ROOK¹³³⁾ z.B. zeigen, daß bei der Montage eines komplizierten Radersystems nur 8 verschiedene Irrtumsarten zu Systemausfällen führen.

Vereinzelte kann für Entwürfe bestimmter betriebswirtschaftlicher Systeme bereits auf unmittelbar verwendbare Zuverlässigkeitstabellen zurückgegriffen werden.¹³⁴⁾

4.3. Prinzipien für die Verteilung der Subfunktionen eines Systems auf Mensch und Maschine

Die unterschiedlichen Qualifikationen von Mensch und Maschine für Teilrollen innerhalb eines Systems machen eine gründliche Aufteilungsplanung beim Entwurf zuver-

132) z.B. kalte Lötung nur erkennbar am fehlenden metallischen Glanz der Lötperle.

133) ROOK, L.W., Reduction of Human Error in Industrial Production, zit. nach MEISTER, D., Human Rel., S. 12-24

134) Hier ist jeweils besonders kritisch zu prüfen, ob die für die Gültigkeit der in Kap. 3 dargestellten analytischen Zusammenhänge notwendige Bedingung, daß ausfallende Elemente sich gegenseitig nicht beeinflussen, gewährleistet ist. MEISTER, D., Human Rel., S. 12-29 ff: Tables of Human Error Rate

lässiger Systeme erforderlich. Es muß darauf hingewiesen werden, daß einmal festgelegte Funktionsaufteilungen im fortgeschrittenen Stadium der Systementwicklung sich nur noch mit großen Schwierigkeiten grundlegend ändern lassen, ohne daß dieses einer totalen Neukonstruktion gleichkäme. Eine rundernte Planung in diesem Frühstadium ist daher besonders bei komplexen Systemen wichtig, da deren vollständige Abänderung mit außerordentlich hohen Kosten sowie mit erheblichem Zeitverlust verbunden ist.

Generell muß die Planung erstens vom Stand der Technik, der eine Vorausentscheidung über das prinzipiell Realisierbare fällt, ausgehen. Die dem Menschen zgedachten Systemfunktionen sind zweitens abhängig von gesellschaftlichen Normen, die von vornherein gewisse Rollen verbieten.¹³⁵⁾ Drittens gibt eine Kostenanalyse Aufschluß darüber, wie vom wirtschaftlichen Standpunkt die Funktionen aufzuteilen sind. Während bei betrieblichen Systemen dies die Hauptkriterien sein werden, treten bei für den Markt produzierten Systemen zusätzlich die Absichten des Konsumenten hinzu, dessen Kaufentscheidung davon abhängen kann, daß das System bestimmte Funktionen ihm überläßt. Übertragen auf das Beispiel "Automobil" hieße das, daß es zur Erhöhung der Zuverlässigkeit zwar richtig sein kann, den Mensch durch den Einbau automatischer Getriebe usw. von möglichst vielen Systemfunktionen zu entlasten, sofern der Mensch aber nicht nur transportiert werden will, sondern tiefenpsychologisch motiviert ist, kann eine solche Entlastung vom subjektiven Systemziel her gesehen falsch sein. So dürfen z.B. die Konstrukteure eines Sportwagens davon ausgehen, daß der Fahrer Kupplung und Schaltknüppel, möglichst viele Schalter und Instrumente bedienen möchte.

135) z.B. in Systemen ohne Überlebenschance

In grober Gegenüberstellung geben folgende Charakteristika einen ersten Anhaltspunkt über die sinnvolle Aufteilung der Systemfunktionen zwischen Mensch und Maschine.

4.3.1. Fähigkeit Daten zu empfangen

Die menschlichen Sinnesorgane sind aufnahmefähig für eine Vielzahl physikalisch-chemischer Reizarten, solange sie sich innerhalb bestimmter Grenzen bewegen. Dabei sollten die Reize in genügendem Abstand von diesen Grenzen liegen, da in den Übergangsbereichen die Identifikationszuverlässigkeit stark abnimmt. Die Fähigkeit, verschiedene Signale mit unterschiedlichem Informationsgehalt simultan zu empfangen, ist begrenzt, dagegen wird die Aufnahmezufverlässigkeit erhöht, wenn die gleiche Information auf mehreren Empfangskanälen gleichzeitig übermittelt wird.¹³⁶⁾ Die Empfindlichkeit für audio-visuelle, taktile sowie Geruchsreize ist sehr hoch.

Maschinen können über diese menschlichen Grenzen hinaus faktisch unbegrenzt Informationen empfangen und sie gegebenenfalls in vom Menschen erfassbare transformieren. Wichtigster Vorteil des Menschen gegenüber Maschinen ist jedoch, Informationen grundsätzlich im logischen Kontext mit anderen Informationen zu sehen. Daher ist er für unerwartet eintretende Daten aufnahmefähig¹³⁷⁾ und kann gleiche Grundschemata in verschiedenen Situationen wiedererkennen. Er kann außerdem durch mangelhafte Erzeugung oder Störung verstümmelte Informationen richtig interpretieren. Das unvollständige Wort ".yst.mzuv... ässigkeit" kann deshalb ohne weiteres verstanden werden. Die assoziative Art der Signalaufnahme durch den Men-

136) z.B. Feuerwehr durch Blaulicht und Martinshorn (audiovisuelle Signale)

137) Grundvoraussetzung für Lesen

schen kann aber umgekehrt auch Ursache besonderer Interpretationsunzuverlässigkeit sein. So erwartet man in unserem Kulturkreis, daß ansteigende Größen auch durch ansteigende oder rechtsdrehende Zeiger dargestellt werden. 138a) Eine umgekehrte Anordnung bringt besonders in kritischen Situationen erhöhte Irrtumsraten.

4.3.2. Fähigkeit Daten zu verarbeiten

Wichtigste Fähigkeit des Menschen ist, aufgenommene Daten in bestimmter Weise zu verarbeiten. Quantitatives und qualitatives Schätzen, vergleichende Urteilsbildung, literarisch gutes Übersetzen, induktiv und deduktiv logisches Denken, Improvisieren, selektives Abberufen relevanter Fakten zum richtigen Zeitpunkt, Abstrahieren, Konzeptbilden, Vorhersagen, Entscheiden sind Fähigkeiten, die von Maschinen entweder überhaupt nicht oder nur auf vergleichsweise primitiver Ebene simuliert werden können. 138)

Wegen seiner außerordentlichen Flexibilität benötigt der Mensch keine präzise Vorprogrammierung, und er kann eigenständig seine Programme entwickeln und modifizieren (Lernprozesse). Werden diese Fähigkeiten jedoch nur auf niedrigem Niveau in das System eingeplant, so können Maschinen mit wesentlich geringeren Reaktionszeiten, größeren Verarbeitungsgeschwindigkeiten und höherer Zuverlässigkeit Daten verarbeiten.

138) SINAÏKO, H.W.-BUCKLEY, E.P., Human Factors in the Design of Systems, in: SINAÏKO, H.W., Papers, S.8: "... man is an general purpose computer with an almost unlimited number of programs available.";

138a) in anderen Kulturkreisen, in denen z.B. von rechts nach links gelesen wird, sind ohne weiteres umgekehrte Assoziationen denkbar

4.3.3. Motorische Fähigkeit

Obwohl der Mensch Maschinen hoffnungslos unterlegen ist im Hinblick auf Intensität, Geschwindigkeit und Ausdauer, mit denen motorische Leistung erbracht werden kann, verfügt er doch über kaum zu ersetzende Bewegungsfähigkeiten. Die direkte Kopplung besonders der Bewegungsapparate Hände und Füße, Lippen und Zunge mit den außerordentlichen Datenverarbeitungsfähigkeiten des Gehirns kann unmittelbar kompliziert strukturierte, motorische Outputs liefern. Mit Hilfe von Füßen und Händen können schwierigste räumliche Verlagerungen des Menschen selbst und anderer Systemelemente vorgenommen werden (z.B. Klettern und Kriechen auf völlig unwegsamem Terrain). Die Hände bewältigen ohne weiteres komplizierte Montagevorgänge oder die Bedienung von Steuerungen. Durch äußerst differenzierte Kombinationen von Lippen- und Zungenbewegungen können komplexe Informationsinhalte in für andere Individuen operationale Form gebracht werden (Sprache). Dabei ist die Zuverlässigkeit bei der Ausführung motorischer Systembeiträge meist außerordentlich hoch (vgl. Kap. 4.2.4.), sofern die Leistungsschwankungen von Kap. 4.2.3. beachtet werden.

4.3.4. Umsystembedingungen

Physiologische Bedürfnisse setzen dem Menschen im Vergleich zu Maschinen enge Existenzgrenzen. Nur in relativ seltenen Fällen sind diese jedoch von Natur aus nicht erfüllt. Wird in die Umsystembedingungen künstlich eingegriffen, so müssen mitunter umfangreiche Maßnahmen vorgesehen werden, um einen Zustand wiederherzustellen, der den physiologischen Bedürfnissen gerecht wird. Unter extremen Bedingungen erfordern Maschinen wenig bis keinen Anpassungsaufwand.

4.3.5. Psychische Bedürfnisse

Diese spezifisch menschliche Einflußgröße hat bei Maschinen keine vergleichbare Parallele. Sie kann Ursache von mitunter beträchtlich herabgesetzter Zuverlässigkeit sein, vgl. Kap. 5.7.

Empfindet der Mensch subjektiv Gefahr für seine persönliche Sicherheit, so ergreift er normalerweise im Gegensatz zu Maschinen, selbst wenn objektiv keine Gefahr vorliegt, spontan Sicherungsmaßnahmen auch dann, wenn sie zur Systemzerstörung führen.

4.3.6. Physikalische Dimensionen

Gemessen an seinen Fähigkeiten ist der Mensch außerordentlich klein und leicht. Maschinen, die nur einen kleinen Teil seiner komplexeren Systembeiträge zu leisten im Stande sind, werden sehr rasch groß und schwer.

4.3.7. Verfügbarkeit

Sollen Systeme kurzfristig verfügbar sein, so kann sich bereits hieraus die Notwendigkeit ergeben, in der Hauptsache auf Menschen als flexibelste Systemelemente zurückzugreifen, da Maschinen oft jahrelange Entwicklungszeiten benötigen.

5. Zuverlässigkeitserhöhende Methoden und ihre Ertragsgesetze

Obwohl die Zuverlässigkeit eines Systems als solche keine selbständig erstellbare Leistung ist, sie also nur in Verbindung mit anderen materiellen oder immateriellen Leistungen überhaupt Bedeutung haben kann, ist es bei den folgenden Erörterungen sinnvoll, von Produktions- und Ertragsfunktionen der Zuverlässigkeit zu sprechen, da die hier betrachteten Faktoreinsätze ausschließlich der Erhöhung der Zuverlässigkeit dienen.

5.1. Zuverlässigkeit durch Redundanzen

Eines der wirkungsvollsten Verfahren zur Erhöhung der Systemzuverlässigkeit stellt das bereits in Kap. 3.4.2. mathematisch vorgestellte Einführen von Redundanzen, das "funktionsbereite Vorhandensein von mehr als für die vorgesehene Funktion notwendigen Mitteln"¹³⁹⁾, dar. Es muß insbesondere in den Fällen angewendet werden, wenn aus nicht überwindbaren Restriktionen heraus die Zuverlässigkeit der Elemente nicht weiter erhöht werden kann, eine höhere Systemzuverlässigkeit aber vom Systemzweck her gefordert wird. Dabei mag dahingestellt bleiben, ob dies prinzipiell nicht möglich ist, aus Termingründen die technische Entwicklung nicht abgewartet werden kann, oder das Redundanzenverfahren allgemein das kostengünstigste ist.

In der Praxis findet das Redundanzenverfahren, ohne daß man sich immer dessen voll bewußt ist, häufige Anwendung. Bei Verkehrsflugzeugen sind Antriebsaggregate, Piloten, Flugregler mehrfach vorhanden. Beim Automobil

¹³⁹⁾ DIN 40042, S.5

werden Ersatzrad und Keilriemen als gleitende bzw. kalte Redundanzen mitgeführt. Hinter dem Prinzip der kollegialen Entscheidungsfindung, hinter dem Einschalten von Kontrollinstanzen, wie allgemein hinter der Einstellung "vier Augen sehen mehr" steht die Erfahrung, daß die Zuverlässigkeit der richtigen Entscheidung oder Erkenntnis bei Entscheidungs- oder Erkenntnisssystemen durch Redundanzen zunimmt.

Trotz dieser vielfältigen Anwendungen werden die systemerforderlichen Redundanzen fast nie mit halbwegs exakten Wahrscheinlichkeitsanalysen begründet, wenn man von den Ergebnissen der Flugzeug- und Elektronikindustrie absieht, sondern mehr gefühlsmäßig und damit nicht immer effizient eingesetzt.

Das allgemeine Ertragsgesetz der Zuverlässigkeit eines redundanten Systems (Abb.25) bestehend aus n in Reihe geschalteten Elementen $S_1, S_2, \dots, S_n$ der Zuverlässigkeit $R_1(t), R_2(t), \dots, R_n(t)$ mit jeweils $x_1, x_2, \dots, x_n$ Redundanzen entsteht durch Vereinigung der Zuverlässigkeitsfunktionen von seriellen und parallelen Elementeschaltungen (Kap. 3.4.1., 3.4.2.).

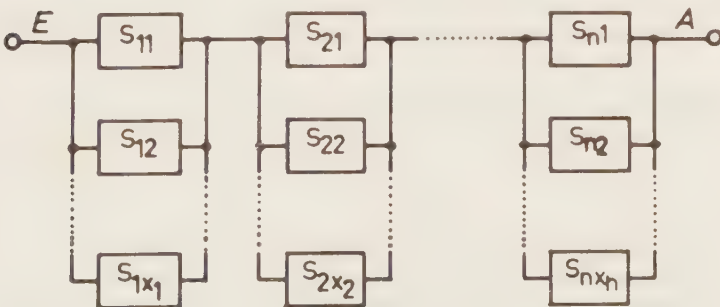


Abb.25: Schaltbild des allgemeinen redundanten Systems

Für ein serielles System mit heißer Redundanz folgt demnach aus den Gleichungen (30) und (42):

(56)

$$R(t) = [1-(1-R_1(t))^{x_1}] \cdot [1-(1-R_2(t))^{x_2}] \cdot \dots \cdot [1-(1-R_n(t))^{x_n}]$$

Diese Beziehung besagt, daß jedes in Serie geschaltete Systemelement S_i ($1 \leq i \leq n$) unabhängig von den übrigen Elementen x_i -mal vermehrfacht und daß jeder Zuverlässigkeitszuwachs eindeutig einer bestimmten Vermehrfachung zugeordnet werden kann.

Unter diesen Umständen ist es naheliegend, die x_i als die Einsatzmengen der Produktionsfaktoren S_i aufzufassen und dann Gleichung (56) als eine Produktionsfunktion vom Typ A¹⁴⁰⁾ (Ertragsgesetz) zu interpretieren, da offenbar die wichtigsten Voraussetzungen für ihre Gültigkeit - Faktoreinsatzmengen unabhängig variierbar, kein Ertragszurechnungsproblem, Faktoren peripher substituierbar - erfüllt sind. Die Terme x_i können zwar nur diskrete Werte (natürliche Zahlen) annehmen, somit stellt Gleichung (56) genaugenommen keine kontinuierliche Ertragskurve sondern eine Schar von Ertragspunkten dar.¹⁴¹⁾ Für die Gültigkeit des Ertragsgesetzes ist dies jedoch nicht unabdingbare Voraussetzung, sondern es genügt, wenn die Einsatzmenge des variablen Faktors jeweils um gleiche, qualitativ nicht voneinander verschiedene Einheiten vermehrt werden kann.¹⁴²⁾

Die bekannte S-Form des Ertragsgesetzes wird durch den Funktionsverlauf der Gleichung (56) nicht bestätigt,

140) GUTENBERG, E., Prod., S.303 ff

141) Aus Gründen der übersichtlicheren Darstellung werden im Folgenden die Ertragspunkte jedoch kontinuierlich miteinander verbunden.

142) JACOB, H., Zur neueren Diskussion um das Ertragsgesetz, ZfhF 9 (1957) (zit. "Diskussion"), S.602

sondern man erhält von allem Anfang an abnehmende Grenz-
erträge $\frac{\Delta R(t)}{\Delta x} \cdot \Delta x$ entsprechend den Abb.26,27(s.Kap.5.8.).

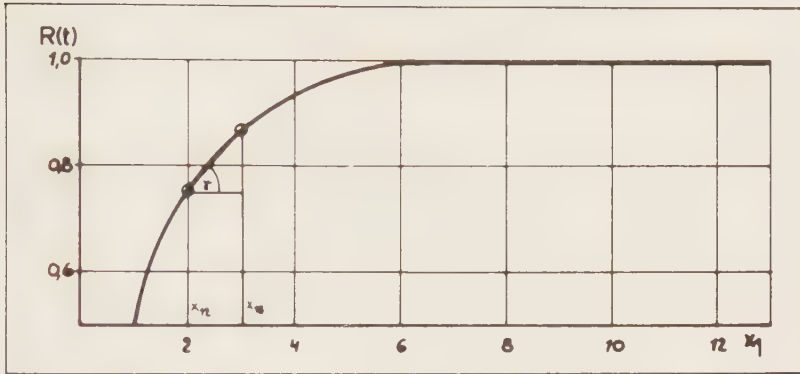


Abb.26: Ertragsgesetz $R(t) = f(x_1)$ für $x_2, x_3, \dots, x_n = \text{const.}$

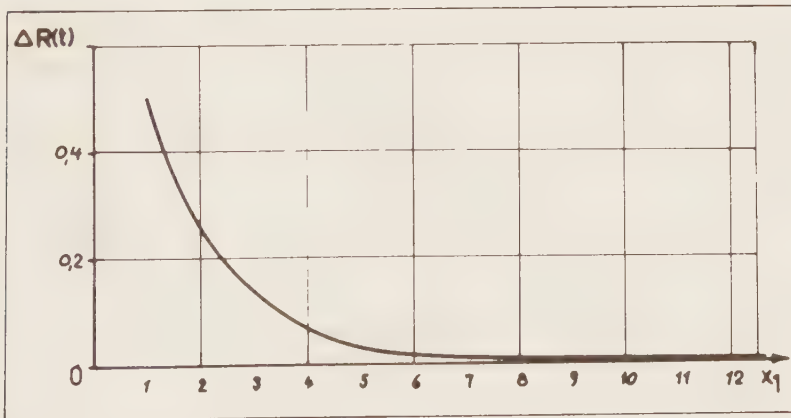


Abb.27: Ertragszuwächse $\Delta R(t) = f'(x_1)$

Durch partielle Differentiation der Beziehung (56) nach der Einsatzmenge x_1 kann die Zuverlässigkeitsgrenzproduktivität des Faktors S_1 isoliert werden. Allgemein

gilt:

$$(57) \quad \frac{\partial R(t)}{\partial x_1} = - \frac{R(t)}{[1-(1-R_1(t))^{x_1}]} (1-R_1(t))^{x_1} \cdot \ln[1-R_1(t)]$$

Werden für die x_1 nur diskrete Werte zugelassen, so kann der partielle Differenzenquotient aus Abb.26 abgeleitet werden:

$$\tan \gamma = \frac{\Delta R(t)}{\Delta x_1} = \frac{[1-(1-R_1(t))^{x_{12}}] \cdot [A] - [1-(1-R_1(t))^{x_{11}}] \cdot [A]}{x_{12} - x_{11}}$$

$$\text{mit } [A] = [1-(1-R_2(t))^{x_2}] \cdot [1-(1-R_3(t))^{x_3}] \cdot \dots \cdot [1-(1-R_n(t))^{x_n}]$$

$$(58) \quad \frac{\Delta R(t)}{\Delta x_1} = \frac{R(t) \cdot [(1-R_1(t))^{x_{11}} - (1-R_1(t))^{x_{12}}]}{[1-(1-R_1(t))^{x_{12}}]}$$

Abb. 28 zeigt in dreidimensionaler Darstellung das Ertragsgebirge¹⁴³⁾ für gleichzeitige Variation der Einsatzmengen x_1, x_2 von zwei Faktoren S_1, S_2 mit der Elementezuverlässigkeit $R_1(t) = R_2(t) = 0,5$. Werden die Horizonte gleicher Zuverlässigkeit in die x_1, x_2 -Ebene projiziert, entsteht die Indifferenzkurvenschar Abb.29. In Anlehnung an die in der Ertragstheorie gebräuchliche Terminologie können die Indifferenzkurven als Zuverlässigkeitsisoquanten oder auch Isozuverlässigkeitslinien bezeichnet werden.¹⁴⁴⁾ Werden die Schnitte für verschiedene x_2 -Werte durch das Ertragsgebirge in die $R(t); x_1$ -Ebene projiziert, ergibt sich Abb.30 .

143) vgl. LÜCKE, W., Produktions- und Kostentheorie, Würzburg-Wien 1969 (zit. "Produktionsth."), S.25 (Abb.7); SCHUMANN, J., Grundzüge der mikroökonomischen Theorie, Berlin-Heidelberg-NewYork 1971, S.81 (Abb. II.i.3)

144) SCHNEIDER, E., Einführung in die Wirtschaftstheorie, B.II, 12.Aufl., Tübingen 1969, S.153, 166

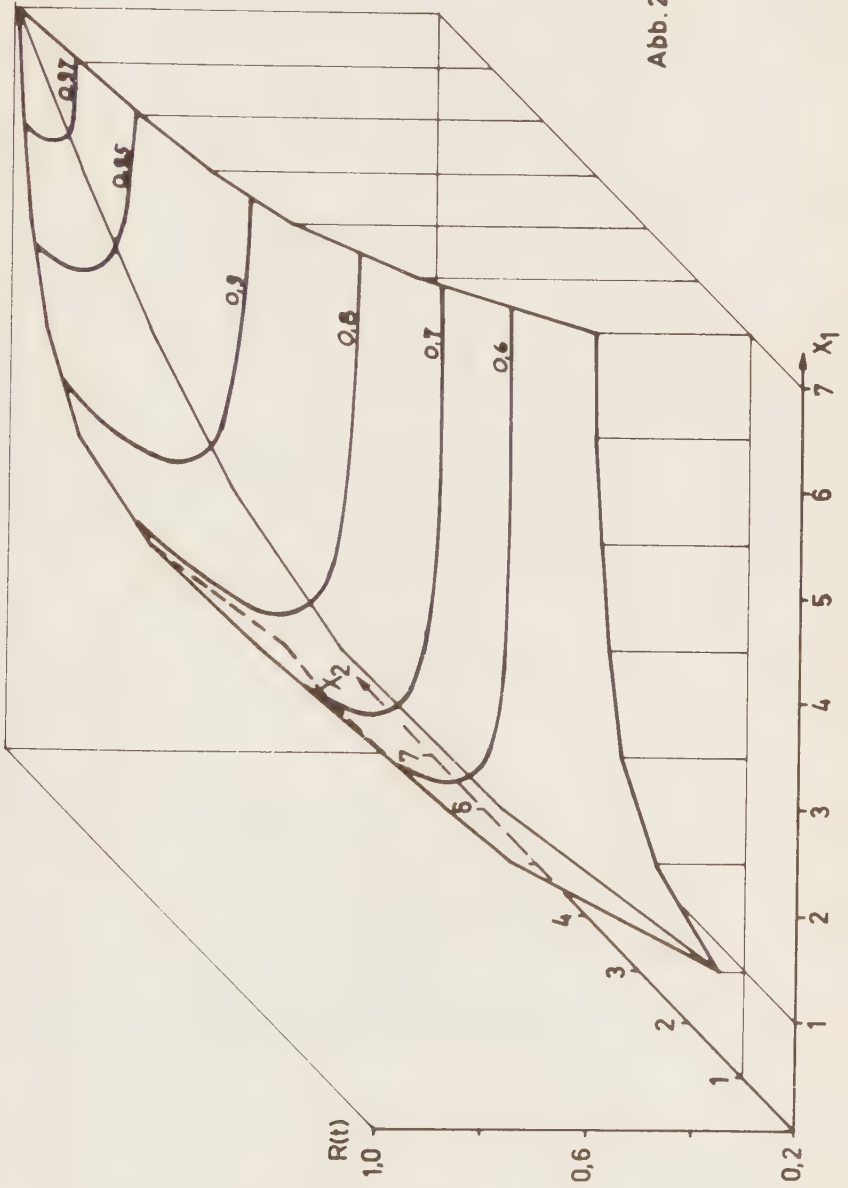


Abb. 28

Tabelle 1: Wertetabelle zu Abb. 28, Abb. 29 und Abb. 50

x_2	x_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,2500	0,3750	0,4375	0,4687	0,4844	0,4921	0,4961	0,4980	0,4990	0,4995	0,4995
2	0,3750	0,5625	0,6563	0,7031	0,7265	0,7383	0,7441	0,7471	0,7485	0,7485	0,7493
3	0,4375	0,6563	0,7656	0,8203	0,8477	0,8613	0,8682	0,8715	0,8733	0,8733	0,8741
4	0,4687	0,7031	0,8203	0,8789	0,9082	0,9229	0,9302	0,9338	0,9357	0,9357	0,9366
5	0,4844	0,7265	0,8477	0,9082	0,9385	0,9536	0,9612	0,9650	0,9669	0,9669	0,9678
6	0,4921	0,7383	0,8613	0,9229	0,9536	0,9690	0,9767	0,9805	0,9825	0,9825	0,9838
7	0,4961	0,7441	0,8682	0,9302	0,9612	0,9767	0,9844	0,9883	0,9902	0,9902	0,9912
8	0,4980	0,7471	0,9715	0,9338	0,9650	0,9805	0,9883	0,9922	0,9941	0,9941	0,9951
9	0,4990	0,7485	0,8733	0,9357	0,9669	0,9825	0,9902	0,9941	0,9961	0,9961	0,9971
10	0,4995	0,7493	0,8741	0,9366	0,9678	0,9838	0,9912	0,9951	0,9971	0,9971	0,9980

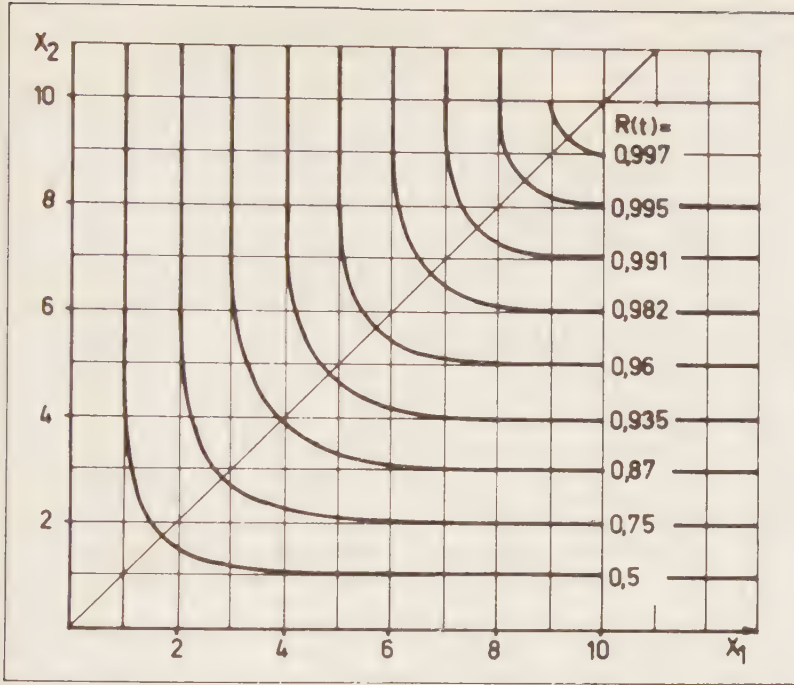


Abb.29: Isozuverlässigkeitslinien

Für ein serielles System mit kalter Redundanz kann das Zuverlässigkeitsertragsgesetz analog Gleichung (56) gebildet werden aus den Beziehungen (30) und (46).

$$(59) \quad R(t) = \prod_{i=1}^n \left[e^{-\lambda_i t} \cdot \sum_{x_i=0}^{m_i-1} \frac{(\lambda_i \cdot t)^{x_i}}{x_i!} \right]$$

Schematisch gelten die Diagramme Abbn. 26-30 auch für dieses Gesetz.

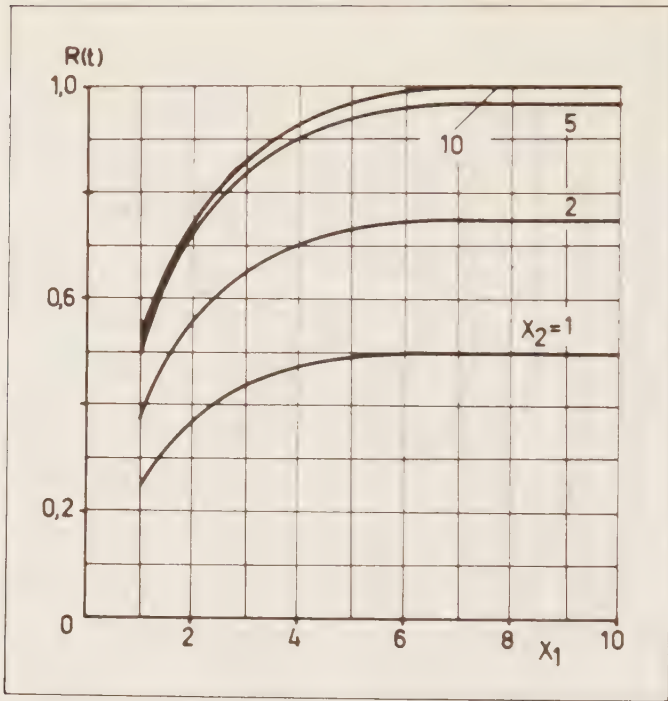


Abb.30: Projektion der Abb.28 in die $x_1, R(t)$ -Ebene

Die in Kap. 3.4.2.3. abgeleiteten Beziehungen für heiße bzw. kalte, gleitende Redundanzen (Gln. 49, 50) repräsentieren bereits die zu (56) und (59) äquivalenten Ertrags-gesetze.

Theoretisch kann mit Hilfe des Redundanzenverfahrens die Zuverlässigkeit beliebig gesteigert werden. In der Praxis sind jedoch die Vermehrfachungsmöglichkeiten aus räumlichen, gewichtsmäßigen und organisatorischen Gründen nur bis zu einem gewissen Grade durchführbar.

5.2. Zuverlässigkeit durch Änderung des Reservierungsmaßstabes

Bei der Schaltung redundanter Systeme können Vermehrungen des gesamten Systems oder von Subsystemen bis hin zu kleinsten Einheiten vorgenommen werden. Das "Niveau" auf dem die redundante Schaltung vorgenommen wird, wird bei GNEDENKO-BELJAJEW-SOLOWJEW¹⁴⁵⁾ als Reservierungsmaßstab bezeichnet. Er ist umso größer, je größer die Teile des Systems sind, die als Ganzes vermehrt werden, Abb.31.

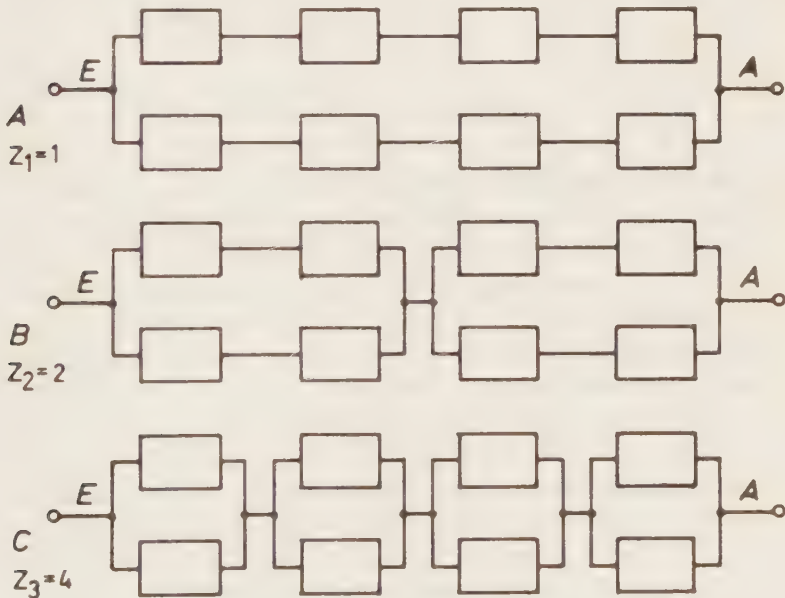


Abb.31: Reservierungsmaßstäbe $A > B > C$, Blockanzahl $Z_1 < Z_2 < Z_3$

145) GNEDENKO-BELJAJEW-SOLOWJEW, Zuverlässigkeitstheorie I, S.174; WILLRETT, H., Erhöhung, S.44 ff

Wesentlich ist, daß durch Variation des Reservierungsmaßstabes nicht die Anzahl der Systemelemente verändert wird, sondern lediglich durch zusätzliche Schaltwege die Zahl der Kanäle, auf denen der Systemzweck verwirklicht werden kann, vergrößert oder verkleinert wird. Mit wachsendem Reservierungsmaßstab nimmt die Zahl dieser Kanäle ab, d.h. die Zuverlässigkeit des Systems wird ebenfalls kleiner. Für die Reservierungsmaßstäbe in Abb.31 gilt demnach $A > B > C$ und für die Systemzuverlässigkeiten $R(t)_A < R(t)_B < R(t)_C$. Das Ertragsgesetz der Systemzuverlässigkeit $R(t)$ in Abhängigkeit von den Blöcken Z kann aus den Gleichungen (30) und (42) für heiße Redundanzen abgeleitet werden:

$$(60) \quad R(t) = \prod_{Z=1}^1 \left(1 - \left(1 - \prod_{i=1}^k R_i(t) \right)^x \right)$$

Hierin bedeuten l die Anzahl der Blöcke, k die Anzahl der seriellen Elemente innerhalb eines Blockes, x die Redundanz, $R_i(t)$ die Zuverlässigkeit der Elemente. In der graphischen Auswertung der Gleichung (60) zeigt sich wiederum, daß die Steigung der Ertragskurve von Anfang an nur abnimmt, d.h. daß nur mit abnehmenden Ertragszuwachsen zu rechnen ist, (Abb.32).

5.3. Zuverlässigkeit durch Verringerung der Zahl aktiver Elemente

Da die Zuverlässigkeit eines Systems mit steigender Zahl der aktiven, d.h. logisch in Reihe geschalteten Elemente entsprechend Gleichung (30) abnimmt, ist es naheliegend, die Systemzuverlässigkeit dadurch zu erhöhen, daß die Systemkonstruktion systematisch auf Glieder untersucht wird, die überbrückbare Funktionen ausüben, ohne daß der eigentliche Systemzweck negativ beeinflußt wird.

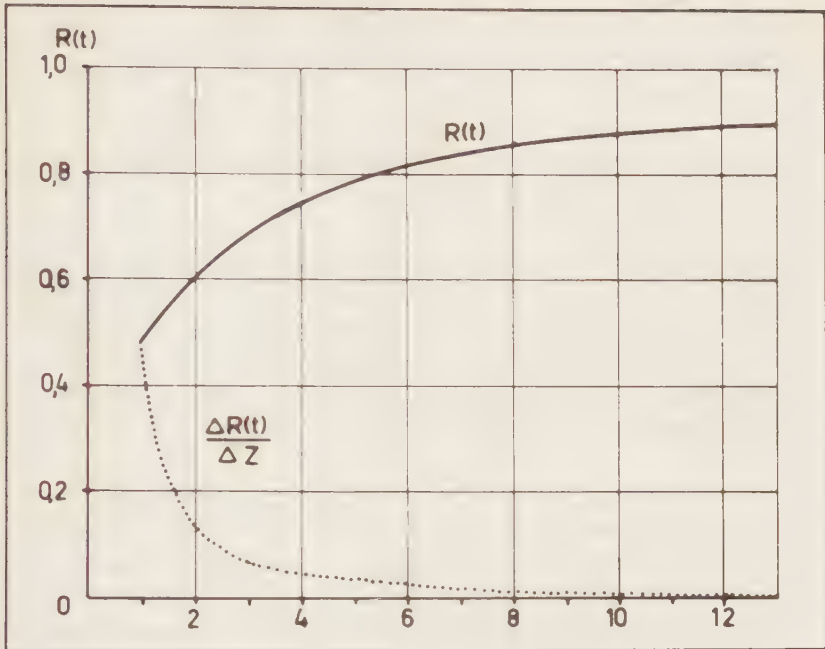


Abb.32: Ertragsgesetz $R(t) = f$ (Blockanzahl Z)

Entscheidend wichtige Voraussetzung für ein solches Vorgehen ist daher, den Systemzweck prägnant zu umreißen und dabei die Minimalforderungen an das System festzusetzen. Das Zuverlässigkeitsertragsgesetz im Falle einer Verminderung der n seriellen Systemelemente um m Elemente folgt dann unmittelbar aus dem Gesetz der logischen Reihenschaltung (30).

$$(61) \quad R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \bigg/ \prod_{j=1}^m R_j(t)$$

Im Allgemeinen sind jedoch die Möglichkeiten für derartige Systemvereinfachungen in der Praxis sehr beschränkt, da meist nur wenige Systemelementefunktionen eingespart

werden können, ohne den Systemzweck nachteilig zu beeinflussen.

5.4. Zuverlässigkeit durch Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Systemelemente

Das wichtigste Verfahren, die Zuverlässigkeit eines Systems zu erhöhen, ist das der konstruktiven Verbesserung oder einer entsprechenden Einwirkung auf die Systemelemente zur Verminderung ihrer Ausfallrate, d.h. durch Forschung und Entwicklung. Dabei müssen zwei grundlegende Stufen unterschieden werden.

Auf der ersten Stufe wird durch gründliches Durchkonstruieren, systematisches Testen und Analysieren der beobachteten Fehler ein im wesentlichen feststehendes Konstruktionskonzept lediglich korrigiert. Im Laufe dieser Phase werden zunächst grobe Fehler erkannt, deren Beseitigung die Systemzuverlässigkeit relativ schnell anwachsen läßt, während in späteren Stadien nur noch immer kleiner werdende Veränderungen mit dementsprechend geringem Einfluß auf das Ausfallverhalten vorgenommen werden können. Trägt man die während einer solchen Entwicklungsphase konstatierten Zuverlässigkeitswerte über der Entwicklungszeit, die notwendig war, um diesen Punkt zu erreichen, ab, so läßt sich unter der Voraussetzung gleichbleibender Faktoreinsätze pro Zeiteinheit der Entwicklung eine Abhängigkeit entsprechend Abb. 33 empirisch nachweisen. Auch hier ist grundsätzlich mit abnehmenden Ertragszuwächsen zu rechnen.¹⁴⁶⁾

146) LLOYD-LIPOW, Reliability, S.330; VIRENE, E.P., Reliability Growth and its Upper Limit (zit. "Rel. Growth"), in: Proc. 1968 Annual Symp. on Rel., S.265 ff; WINLUND, E.S., Cost-Effectiveness Analysis for Optimal Reliability and Maintainability (zit. "Cost-Eff."), in: Proc. 11th Nat. Symp. on Rel., S.107 ff

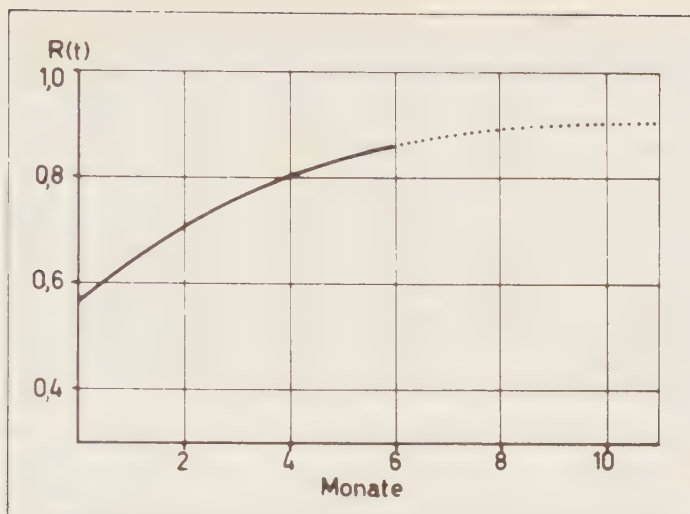


Abb.33: Wachstum der Elementezuverlässigkeit in Abhängigkeit von der Entwicklungszeit und Extrapolation auf zu erwartende Zuverlässigkeitswerte mit Hilfe der GOMPERTZ-Gleichung (nach VIRENE)

Untersuchungen in der Praxis haben ergeben, daß sich der Kurvenverlauf im Zuge der Entwicklungsarbeit kontinuierlich fortsetzt, weshalb VIRENE vorschlägt, vermittels einer Exponentialfunktion höherer Ordnung die zu erwartende Zuverlässigkeitssteigerung in Abhängigkeit von der Entwicklungszeit bis zu ihrer obersten Grenze zu extrapolieren,¹⁴⁷⁾ eine Angabe, der im Rahmen der betrieblichen Terminplanung eine besondere Bedeutung zukommt, Abb.33 (gepunkteter Kurvenabschnitt). Wesentliche Erkenntnis ist hierbei, daß lediglich durch Testen und Korrigieren die Zuverlässigkeit über ein bestimmtes Maß nicht hinausgehoben werden kann.

147) VIRENE, E.P., Rel.Growth, S.265 benutzt die GOMPERTZ-Gleichung

$$R(t) = a \cdot b^{c^t}$$

148) vgl. LLOYD-LIPOW, Reliability, S.330 f; BALL-HILL, Introduction, S.4

An diesem Punkt muß die zweite Stufe zum Zuge kommen, bei der dann das gesamte Konstruktionskonzept in Frage gestellt und ein grundlegend neues entwickelt werden muß, von dem erwartet werden kann, daß es höhere Endzuverlässigkeiten bringt. Kennzeichnend hierfür ist, daß die Zuverlässigkeit zunächst unter das bereits erreichte Niveau fällt, jedoch nach kurzer Test- und Korrekturzeit das vorherige wieder erreicht, um es dann zu überholen.¹⁴⁸⁾ Schematisch kann der Funktionsverlauf des Zuverlässigkeitszuwachses durch Verbesserung der Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit von der Entwicklungszeit entsprechend Abb.34 dargestellt werden.¹⁴⁹⁾

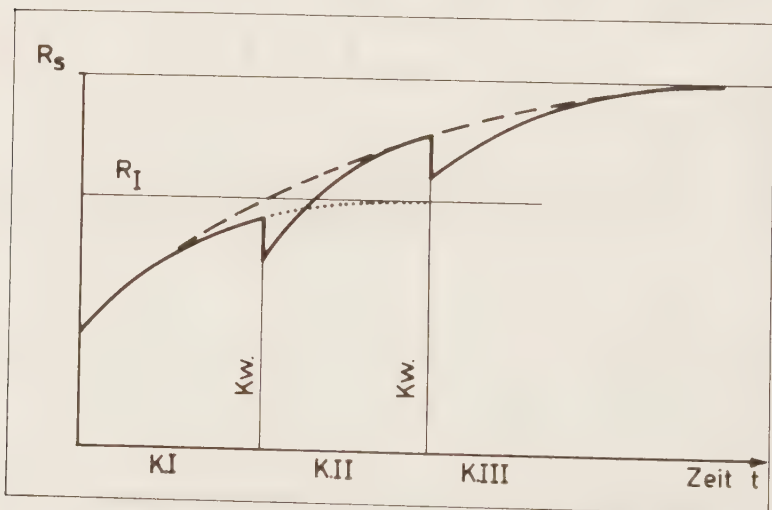
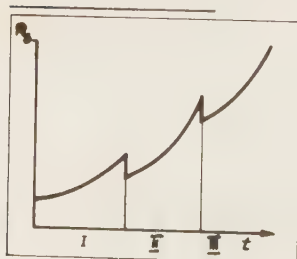


Abb.34: Zuverlässigkeitswachstum während der Entwicklung eines Systems (Kw. Konzeptwechsel)



149) LLOYD-LIPOW, Reliability, S.330 irren wohl, wenn sie den Funktionsverlauf qualitativ entsprechend nebenstehender Abb. angeben, da er mit ihrer eigenen Angabe, daß das "law of diminishing returns" gilt, nicht übereinstimmt.

Es wird deutlich, daß Konzept I nur bis zur Zuverlässigkeit R_I gesteigert werden könnte. Durch Konzeptwechsel erreicht die Systemzuverlässigkeit dann sägezahnförmig den angestrebten Wert R_S .

Die quantitative, nicht empirische Beschreibung des Zusammenhanges zwischen eingesetzten Produktionsfaktoren und Zuverlässigkeitsertrag steht vor den bekannten Ertragszurechnungsschwierigkeiten, und es erscheint auch problematisch, wie man so wichtige Faktorqualitäten, wie Einfallsreichtum und Erfahrung des Entwicklungsteams erfassen soll.

Trotzdem glaubt WINLUND eine Bestimmungsgleichung angeben zu können, die für technische Systemelemente den Zusammenhang zwischen dem Zuverlässigkeitszuwachs und den in Geldeinheiten bewerteten Einsatzfaktoren näherungsweise beschreibt.¹⁵⁰⁾

$$\text{Reliability acquisition cost} = 0,2 \cdot C_a \cdot \ln(I_r)$$

Hierin bedeuten C_a die gegenwärtigen Systemkosten und I_r das Verhältnis der angestrebten mittleren Lebensdauer zur gegenwärtig bereits erreichten. Obwohl in gewisser Weise der individuellen Kostenstruktur dadurch Rechnung getragen wird, daß die Beziehung den Kostenzuwachs von den bereits verwirklichten Systemkosten abhängig macht, erscheint doch fraglich, ob ein derart starres Modell die Wirklichkeit hinreichend genau beschreiben kann. Qualitativ wichtig ist aber, daß WINLUND ebenfalls einen e-funktionalen Kostenverlauf seinen Überlegungen zugrunde legt.

150) WINLUND, E.S., Cost-Eff., S.109

Die an technischen Systemelementen beobachtete Zuverlässigkeitsertragsfunktion durch forschungs- und entwicklungsbedingte Leistungsfähigkeitssteigerung (Abb.33) gilt prinzipiell in gleicher Weise für Zuverlässigkeitssteigerungen durch Trainings- und Lernprozesse beim Menschen. LEHMANN¹⁵¹⁾ weist darauf hin, daß die Leistungssteigerung und damit die Verminderung der Neigung zu Fehlverhalten "proportional dem Logarithmus der Zeit" verläuft, wobei die Kurve grundsätzlich bei Geschicklichkeitsarbeit oder einer geistigen Tätigkeit den gleichen Verlauf hat, Abb.35.¹⁵²⁾ (vgl. Abb.33)

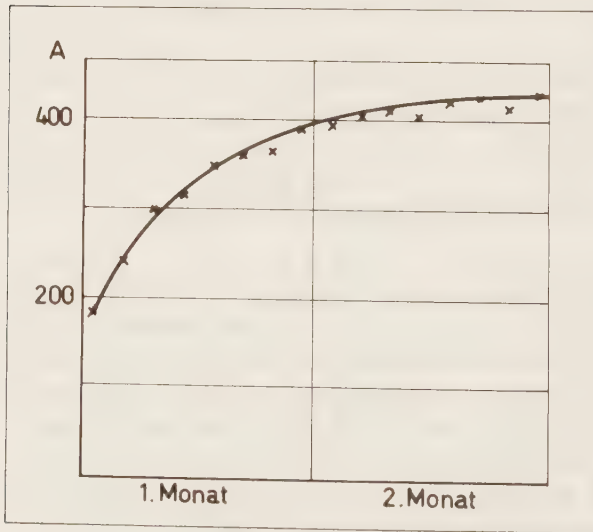


Abb.35: Übungsanstieg beim Lösen von Rechenaufgaben
(nach LEHMANN) (A Anzahl der gelösten Aufgaben)

Der Anpassungsprozeß ist einmal darauf zurückzuführen, daß durch häufiges Wiederholen des Systembeitrags die Teilbeiträge eine Verbesserung in Koordination und Zu-

151) LEHMANN, G., Arbeitsphys., S.72

152) ebenda, S.73

sammenspiel erfahren. Dieser "Glättungsprozeß" geht einher mit physiologischen Veränderungen im Organismus, die ihn geeigneter für die Leistung des geforderten Systembeitrags machen (Training).¹⁵³⁾ Die Sägezahnkurve Abb.34 wiederholt sich entsprechend, wenn jede Konzeptänderung anthropometrischen Erkenntnissen oder sonstigen Voraussetzungen für gesteigerte menschliche Leistungsfähigkeit stärker Rechnung trägt, wobei dann die vorläufigen Rückfälle auf ein tieferes Zuverlässigkeitsniveau darauf zurückzuführen sind, daß bereits erreichte spezifische Anpassungszustände bei Änderung der Beanspruchung nicht mehr zum Tragen kommen können.

5.5. Zuverlässigkeit durch Unterlastung

Wie bereits in Kap. 4.2.3. angedeutet, ist die Ausfallrate auch von der Belastungsintensität, d.h. vom Verhältnis Istlast/Nennlast abhängig. Dieser Sachverhalt ist im wesentlichen darauf zurückzuführen, daß Elemente auf ein bestimmtes Leistungsmaximum ausgelegt sind, um diesen Wert aber normalverteilt streuen. Umgekehrt hat man es nahezu nie mit völlig konstanten Belastungen zu tun, sondern diese alternieren um einen mittleren Wert. Auf diese Weise können "Lastspitzen" auftreten, die die individuelle Leistungsfähigkeit kurzfristig überschreiten können (schraffierter Bereich in Abb.36), was dann zu Systemausfällen führt. Je weiter die Mittelwerte M und S_m voneinander entfernt werden, desto kleiner wird der schraffierte Bereich und desto kleiner wird auch die Ausfallrate. Durch die Herabsetzung der Belastung bzw. eine Überdimensionierung der Systemelemente wird demnach die Zuverlässigkeit des Systems er-

153) vgl. hierzu im Einzelnen STEGEMANN, J., Leistungsphys., S.23 ff; LEHMANN, G., Arbeitsphys., S.72 ff

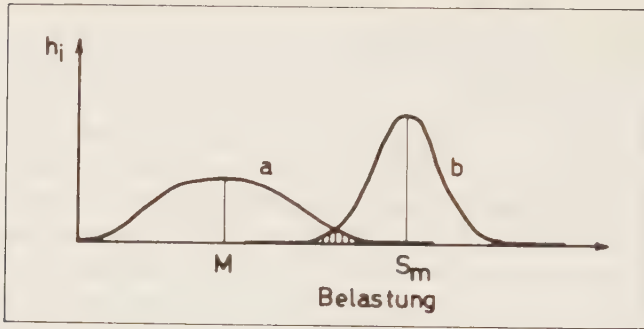


Abb.36: Häufigkeitsverteilungen h_i der Belastungsintensitäten (a) und der Elementeleistungsfähigkeiten (b)

höht. Die Abhängigkeit zwischen Zuverlässigkeit und Belastungsintensität ist logarithmisch¹⁵⁴⁾ und entspricht Abb. 37.

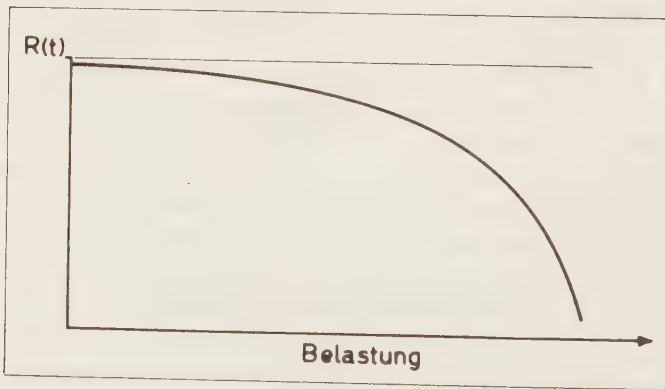


Abb.37: Zuverlässigkeit als Funktion der Belastung

Treten verschiedene Belastungsarten kumulativ auf, so überlagern sie sich derart, daß im Zusammenwirken nicht

154) BAZOVSKY, J., Reliability, S.148

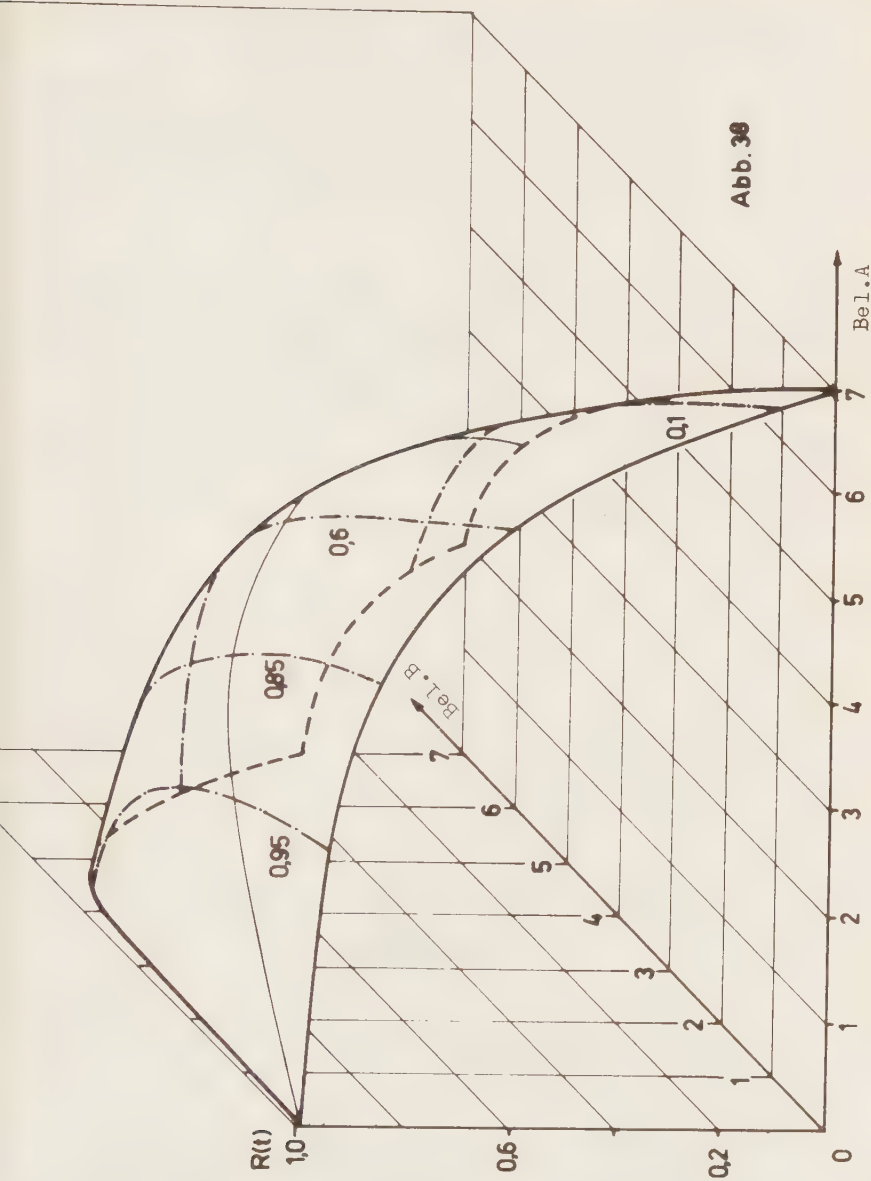


Abb. 38

die bei einzelndm Auftreten erzielbaren Zuverlässigkeitsmaximalwerte erreicht werden können, Abb.38. In der Praxis wird Abb.38 meist als zweidimensionales Kennlinienfeld dargestellt, wobei als Zuverlässigkeitsparameter in der Regel die Ausfallrate angegeben wird,¹⁵⁵⁾ Abb.39.

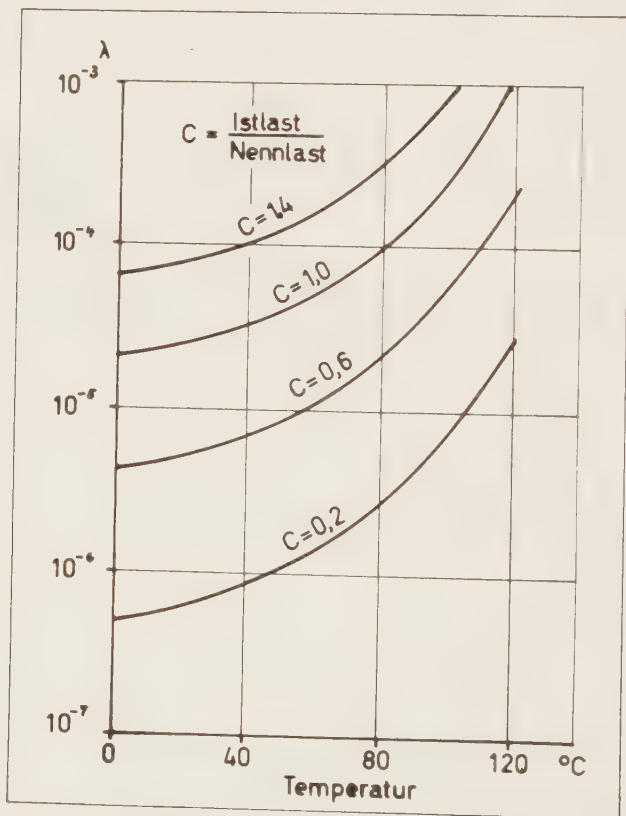


Abb.39: Typisches Beispiel für die Abhängigkeit der Ausfallrate vom Verhältnis Istlast/Nennlast und der Umgebungstemperatur

155) CONNOR, J.A., Reliability Prediction, in: MYERS-WONG-CORDY, Rel. Engineering, S.86 ff; NARESKY, J., Zuverlässigkeit, S.623; RADC Reliability Notebook, RADC TR-50-211; HUMMITSCH, P., Zuv., S.53; DOMBROWSKI, E., Einführung, S.95 ff

5.6. Zuverlässigkeit durch vorbeugende Instandhaltung

Erfüllt der Verlauf der Ausfallrate $\lambda(t)$ der Systemelemente bestimmte qualitative Voraussetzungen, so kann die Systemzuverlässigkeit auch durch vorbeugende Wartungsmaßnahmen und Elementeaustausch erhöht werden.

Handelt es sich bei den beobachteten Ausfällen um echte Zufallseignisse ($\lambda(t) = \text{const.}$), so sind vorbeugende Wartung und Elementeaustausch zum Zeitpunkt t_w sinnlose Maßnahmen, da Kosten entstehen, ohne daß die Ausfallrate $\lambda(t)$ in irgendeiner Form beeinflußt worden wäre, Abb. 40, A. Da für den Zufallsausfall kennzeichnend ist, daß er auf keine vornersenbare Ursache zurückzuführen ist, kann auch keine Wirkung von vorbeugenden Maßnahmen ausgehen.

Fällt die Ausfallrate $\lambda(t)$ mit der Zeit ab [$\lambda(t) > \lambda(t+\Delta t)$], bei Verhältnissen also, wie sie im Bereich der Einbrenn- oder Lernphasen auftreten, dann sind Austauschmaßnahmen besonders ungünstig, da nun den hiermit verbundenen Kosten sogar eine Verschlechterung der Systemzuverlässigkeit gegenübersteht, Abb. 40 B. Durch das Auswechseln der Elemente geht nämlich das während der bereits verstrichenen Einbrenn- oder Lernzeit erreichte Zuverlässigkeitsniveau wieder verloren. Die Ausfallrate steigt jeweils sägezahnförmig wieder an, wodurch die Zuverlässigkeit $R(t)$ einen Verlauf entsprechend Kurve b in Abb. 40 B erhält.

Eine Systemwartung kann allerdings in bestimmten Fällen von Vorteil sein, wenn sie dazu führt, daß die Einbrennphase schneller überwunden wird (Kurve c in Abb. 40 B). Deutlich wird dies z.B. bei der Betrachtung der Wirkung

gezielter Erholungspausen auf das Lernvermögen des Menschen.

regelmäßig vorteilhaft im Hinblick auf die Systemzuverlässigkeit ist es, wenn vorbeugende Instandhaltungen und Elementeaustausch bei Systemelementen mit ansteigender Ausfallcharakteristik [$\lambda(t) < \lambda(t+\Delta t)$] vorgenommen werden, d.h. also in Fällen, in denen Verschleiß, Ermüdung oder ähnliche Erscheinungen die Ausfallursache sind, Abb.40,C.

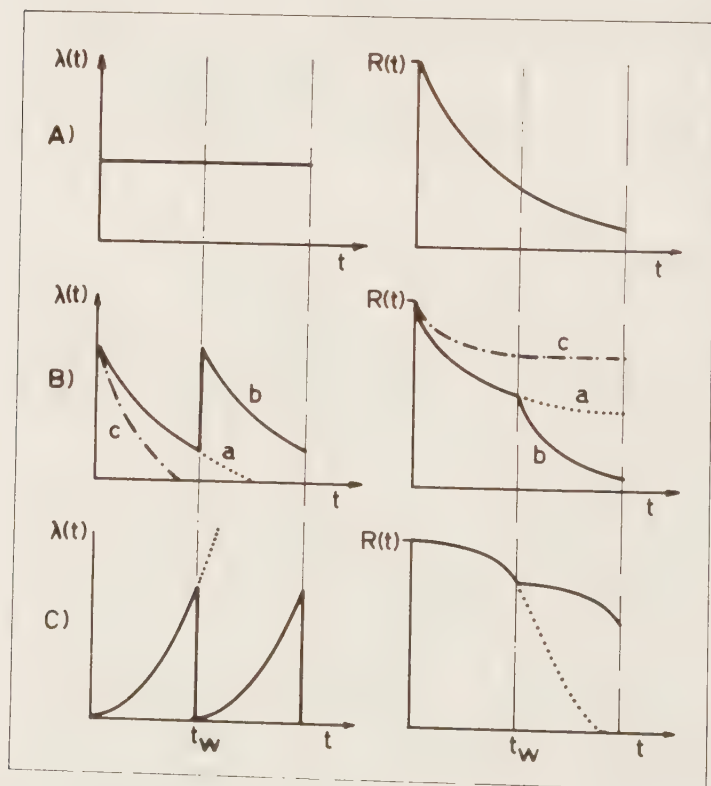


Abb.40: Gegenüberstellung der Einflüsse auf die Zuverlässigkeit durch vorbeugende Instandhaltung für verschiedene $\lambda(t)$ (t_w Zeitpunkt der Instandhaltungsmaßnahme)

Bezogen auf Elemente, deren Ausfallverhalten entsprechend der Mischverteilung Kap. 4.1. verläuft, bedeutet dies, daß präventive Wartungsmaßnahmen frühestens zu Beginn der Phase III sinnvoll sind.

Unter der Voraussetzung, daß die Systemelemente durch vorbeugende Instandhaltung wieder in ihren Initialzustand gebracht werden, eine Bedingung, die für Elementeaustausch auf jeden Fall gegeben ist, sowie unter der vorläufigen Annahme, daß der Wartungsvorgang zeitlos vorgenommen wird, nimmt die Ausfallrate eine Sägezahncharakteristik entsprechend der Abb.41 an.

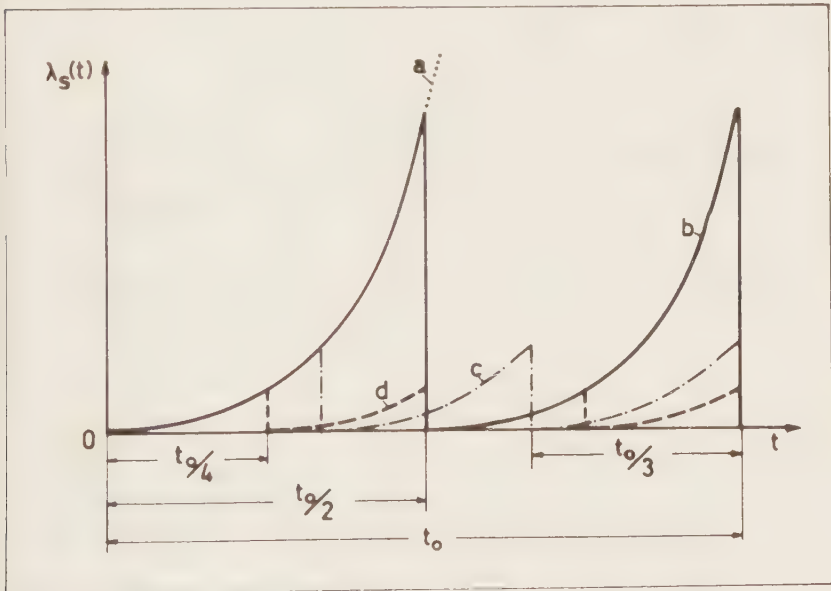


Abb.41: Verlauf der Ausfallrate bei 0(a), 1(b), 2(c), 3(d) Wartungsmaßnahmen in äquidistanten Zeitabständen.

- 156) Hinweise auf diese Zusammenhänge finden sich auch bei MESSERSCHMIDT-BÖLKOW-BLOHM, Tech. Zuv., S.197 f; BUSSMANN-KRESS-KUHN, Instandhaltungsstrategien als Mittel zur Senkung der Instandhaltungskosten..., in: BUSSMANN-MERTENS, Operations Res., S.31 f

Werden während der Aktivitätsdauer t_0 insgesamt n Wartungen in äquidistanten Zeitabständen vorgesehen, so bricht die individuelle Funktion der Ausfallrate $\lambda(t)$ jeweils nach Ablauf der Zeit $t = t_0 / (n+1)$ ab, und es beginnt diejenige des durch Austausch oder Überholung an seine Stelle getretenen Folgeelementes. Stellt man den Verlauf der Zuverlässigkeit $R(t)$ über der Gesamtaktivitätsdauer t_0 entsprechend Abb.41 dar, so ergibt sich Abb.42.

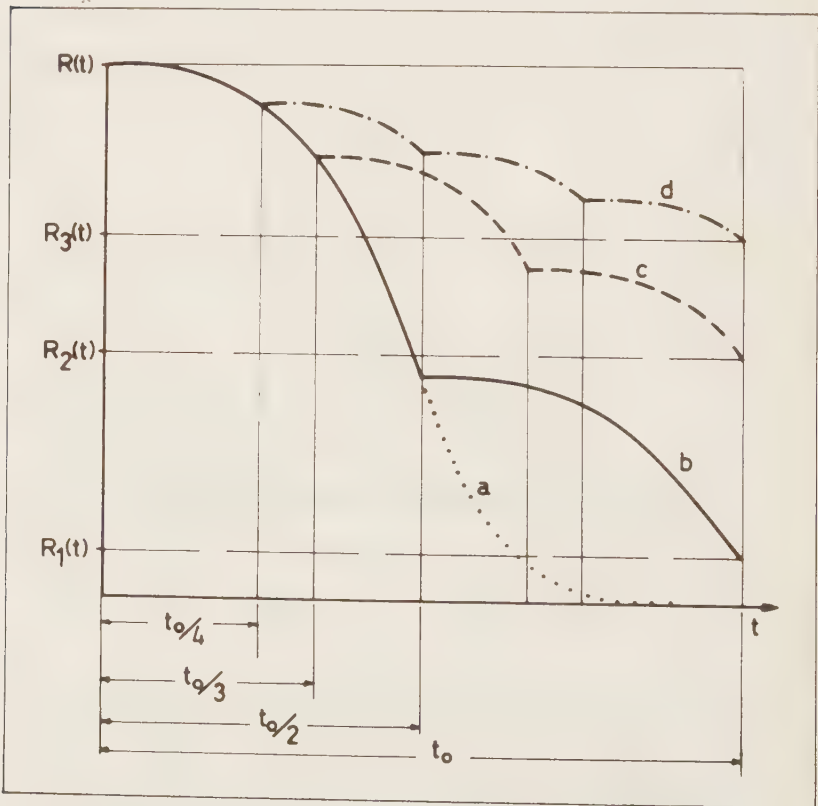


Abb.42: Verlauf der Zuverlässigkeit bei 0(a), 1(b), 2(c), 3(d) Wartungsmaßnahmen in äquidistanten Zeitabständen.

Das Abb.42 zugrunde liegende Zuverlässigkeitsertragsgesetz folgt aus Gl. 12. Da der Exponent in dieser Beziehung die Fläche unter dem Funktionsverlauf der Ausfallrate repräsentiert, ist für den Exponenten nun die Summe der Teilflächen in Abb.41 zu setzen, d.h. das Produkt aus dem Integral über $\lambda(t)$ von 0 bis $t / (n+1)$ und der Anzahl der Aktivitätsintervalle $(n+1)$.

$$t/(n+1)$$

$$(62) \quad R(t) = \exp \left[- (n+1) \int_0^{t/(n+1)} \lambda(t') \cdot dt' \right]$$

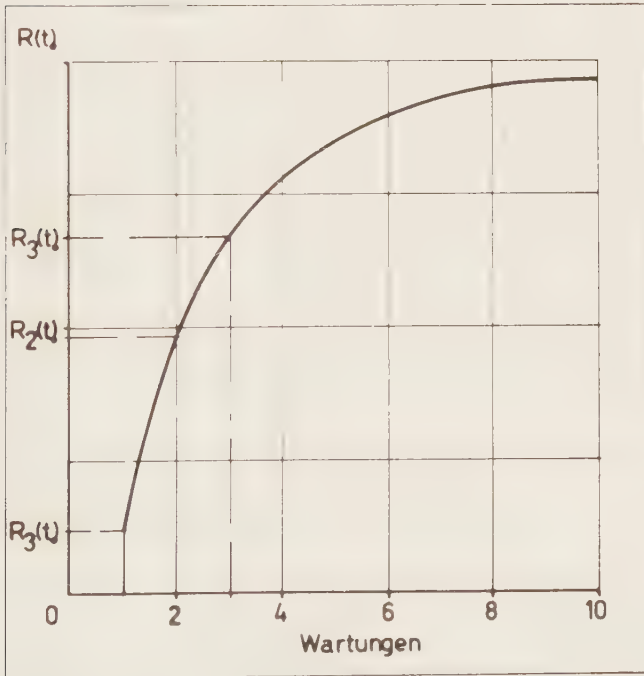


Abb.43: Zuverlässigkeitsertragsgesetz bei vorbeugender Instandhaltung

Aus Gleichung (62) kann umgekehrt die Anzahl der erforderlichen Wartungen n_{erf} abgeleitet werden, wenn eine Minimalzuverlässigkeit $R_{\text{min}}(t)$ gefordert wird.

$$(63) \quad n_{\text{erf}} = - \left[1 + \ln R_{\min}(t) \int_0^{t/(n+1)} \lambda(t') dt' \right]$$

Gleichung (63) kann nur iterativ durch Variation von n ausgewertet werden. Dezimalstellen von n_{erf} sind auf ganze Zahlen aufzurunden.

5.7. Zuverlässigkeit durch Einwirkung auf die Psyche

Der Mensch im speziellen kann in seinem Zuverlässigkeitsverhalten zusätzlich durch Methoden beeinflusst werden, die sich wenigstens nach dem bisherigen Kenntnisstand einer mathematischen Systemanalyse weitgehend widersetzen und insofern nicht Gegenstand dieser Untersuchung sind. Aus Gründen der Vollständigkeit sollen aber einige wichtige psychologisch-soziologische Einflußgrößen kurz angedeutet werden, da durch sie das menschliche Verhalten so stark beeinflusst wird, daß selbst bei optimalem Einsatz der bisher beschriebenen Methoden der Zuverlässigkeitserfolg wieder verloren gehen kann.

Ob der Mensch dem von ihm geforderten Systembeitrag tatsächlich leistet, hängt entscheidend von seinem persönlichen Willen, seiner Motivation zu adäquater Beitragsleistung ab.

Ist das Systemziel unmittelbar Motiv¹⁵⁷⁾ für seine Eigenschaft als Systemelement, so kann positiver Willen zur

157) Zur Definition des Begriffes "Motiv" s. STUCKMANN, G., Der Berufserfolg als Motivationsphänomen, Berlin 1968, S.15: "Motiv soll als eine persönlichkeitsimmanente, relativ überdauernde und auf ein Ziel gerichtete Disposition definiert werden.", "Motivation entsteht, wenn die Umweltbedingungen die Erwartung hervorrufen, daß das Vollbringen einer Tat zu einem Ziele führen wird, für das in der Person ein Motiv vorhanden ist."

Leistung unterstellt werden. Diese Bedingung wird meist dann vorliegen, wenn der Mensch sich direkt als Konsument an einem System beteiligt.

Erheblich differenzierter und unberechenbarer ist das Verhalten des Menschen, wenn er nur mittelbar ein Motiv zur Teilnahme am System hat, eine Bedingung, die im Regelfall in der betrieblichen Organisation vorliegt, in der der Mitarbeiter nicht direkt am Systemziel, sondern nur an den "Ausgleichszahlungen"¹⁵⁸⁾ ein Interesse hat. Hier wird im Grunde der Komplex soziale Machtausübung durch Führungsstile angesprochen, die letztlich darauf abzielen, das Systemelement Mensch im Hinblick auf systemkonformes Verhalten zu motivieren. Methoden der Zuverlässigkeitserhöhung im Sinne dieses Kapitels bestehen daher in der Ausübung wirksamer Macht.

Einer Einteilung von KLIS¹⁵⁹⁾ folgend, der seinerseits auf Untersuchungen von FRENCH-RAVEN¹⁶⁰⁾ sowie von GILMAN¹⁶¹⁾ zurückgreift, ist von folgendem Katalog der Machtgrundlagen auszugehen:

- Fähigkeit zu Belohnung und Bestrafung
- legitimierte Machtausübung
- Anerkennung als Experte
- Identifizierung des Machtunterworfenen mit dem Machthaber
- Fähigkeit zu manipulieren
- Fähigkeit zu überzeugen

158) vgl. Anreiz-Beitragstheorie, z.B. bei KUPSCH-MARR, Personalwirtschaft, in: HEINON, E., Industriebetriebslehre, S.459 ff, 493 ff

159) KLIS, M., Machttheoretische Grundlagen moderner Führungsstile, ZfO 40 (1971) 1, S.8 f; s.a. KLIS, M., Überzeugung und Manipulation - Grundlagen einer Theorie betriebswirtschaftlicher Führungsstile, Wiesbaden 1970, S. 73 ff

160) FRENCH, J.R.P.-RAVEN, B., The Basis of Social Power, in: CARTWRIGHT, D.(ed.), Studies in Social Power, Ann Arbor-Mich. 1959, S.150 ff

Je nach persönlicher Fähigkeit und welchem Stilkonzept der Betreffende folgen will, ergeben sich aus diesem Machtgrundlagenkatalog konkrete, die Zuverlässigkeit beeinflussende Führungsstile. Da es sich hier um einen Sonderfall des Kap. 5.4. "Zuverlässigkeit durch Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Systemelemente" handelt, kann ebenfalls mit einem exponentiell abnehmenden Ertragszuwachs gerechnet werden.

Besonders erfolgreich im Hinblick auf Zuverlässigkeits- und Qualitätssteigerungen¹⁶²⁾ scheinen Methoden zu sein, die sich Erfahrungen der Human-Relations-Bewegung zunutze gemacht haben. So wird berichtet von "Zero-Defects-Programms"¹⁶³⁾, bei denen der persönliche Ehrgeiz der Mitarbeiter in einer Unternehmung durch Prämien und Ehrungen aller Art auf das (utopische) Ziel absoluter Zuverlässigkeit (Null Fehler) gelenkt wird. Aber auch weniger euphemistische Methoden bringen erhebliche, auf die Dauer vermutlich sogar nachhaltigere Erfolge. Zu nennen sind hier das von General Dynamics entwickelte "Product Improvement Training PIT", das mit Gruppeninterviews auf allen Stufen der Produktion arbeitet und das Verhältnis zwischen Arbeitssubjekt und -objekt durch verstärkte Kommunikation verbessert, sowie das Bilden von Qualitätszirkeln in den Industrien Japans, bei denen sich Arbeiter um ihre Vorarbeiter gruppieren, um von sich aus Vorschläge zur Qualitätsverbesserung auszuarbeiten.¹⁶⁴⁾

-
- 161) GILMAN, G., An Inquiry into the Nature and Use of Authority, in: HAIRE, M. (ed), Organisation Theory in Industrial Practice, New York 1962, S. 105 ff
 - 162) In Sinne dieses Kapitels können Methoden der Qualitätserhöhung unmittelbar auf die Zuverlässigkeit übertragen werden.
 - 163) z.B. SUMERLIN, W.T., Winning Reliability Management Techniques - Vintage 1966, in: Proc. 1967 Annual Symp. on Rel., Washington 1967, S. 104 ff: S. schildert die Managementtechniken bei den amerik. Projekten MERCURY, GEMINI, F-4 PHANTOM II; OSANN, F., Commercial Rel., S. 584; STRAUCH, H., Qualitätsverb., S. 199 ff
 - 164) STRAUCH, H., Qualitätsverb., S. 187 ff

JURAN¹⁶⁵⁾, einer der namhaftesten Qualitätsexperten der USA, sah sich durch die Erfolge des japanischen Verfahrens sogar zu der Schlußfolgerung veranlaßt, daß Japan in den nächsten beiden Jahrzehnten die Führung in der Welt auf dem Qualitätsgebiet übernehmen wird.

5.8. Produktionstheoretische Anmerkungen

Bei allen zuverlässigkeitserhöhenden Methoden konnte das Gesetz vom abnehmenden Ertragszuwachs nachgewiesen werden, wobei besonders im Falle der Redundanzenmethode die für produktionstheoretische Untersuchungen typischen Voraussetzungen - Faktoreinsatzmengen frei variierbar, kein Ertragszurechnungsproblem, Einproduktartenproduktion - einwandfrei erfüllt sind, und sich außerdem der gesamte Produktionsprozeß vollständig mathematisch-analytisch überschauen läßt.

In den meisten Beiträgen wird bei Produktionsverhältnissen, für die obige Voraussetzungen unter der auch hier erfüllten Zusatzbedingung peripherer Substituierbarkeit der Faktoren gelten, mit abnehmenden Grenzerträgen erst von einer gewissen Grenze an gerechnet¹⁶⁶⁾, d.h. es wird ein S-förmiger Ertragsverlauf angenommen. Auch die Kritik GUTENBERG's an der Gültigkeit des Ertragsgesetzes im industriellen Bereich entzündet sich nicht an der Frage, ob unter Zugrundelegung dieser Produktionsbedingungen die gezogenen Folgerungen berechtigt sind oder nicht, sondern er ist der Ansicht, daß eben diese Voraussetzungen jedenfalls in der betrieblichen Wirklichkeit nicht nachweisbar sind, was dann bei ihm zu dem andersartigen Denkansatz

165) JURAN, J.M., The Japanese Quality Control Circles: Questions and Answers, Qual (1967) 2, S.37ff

166) z.B. v. STACKELBERG, H., Grundlagen der theoretischen Volkswirtschaftslehre, 2.Aufl., Tübingen 1951 (zit. "Grundlagen"), S.39

der Produktionsfunktion als ein System von Verbrauchsfunktionen führt.¹⁶⁷⁾

Ergebnis der vorliegenden Untersuchung ist, daß zumindest im Rahmen der Systemtheorie, die überhaupt nicht an spezielle Bedingungen in der Landwirtschaft oder der Industrie anzuknüpfen braucht, Produktionsfunktionen nachgewiesen werden können, für die einerseits die Voraussetzungen für die Gültigkeit des "klassischen Ertragsgesetzes" gelten, für die aber andererseits trotz dieser Voraussetzungen von allen Anfang an mit ausschließlich abnehmenden Ertragszuwachsen zu rechnen ist. Im Grunde führt die Zuverlässigkeitstheorie zurück auf ein Gesetz abnehmender Grenzerträge, wie es bereits den ursprünglichen Vorstellungen von TURGOT oder v.THÜNEN entsprochen hat.^{167a)}

Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, daß MITSCHERLICH¹⁶⁸⁾ beim empirischen Studium des Pflanzenwachstums hinsichtlich des Ertragszuwachses exakt denselben Gleichungstypus, wie er für die Zuverlässigkeitszuwächse gefunden wurde, nachweisen konnte. Er formuliert ein "Gesetz der physiologischen Beziehungen", das besagt, daß "... der Pflanzenertrag mit der Steigerung (eines) Wachstumsfaktors proportional dem an einem Höchstertrage fehlenden Ertrage ansteigt."¹⁶⁹⁾ In mathematischer Schreibweise bedeutet dies:

(64)

$$y = A (1 - e^{-cx})$$

167) GUTENBERG, E., Prod., S.326ff: Produktionsfunktion vom Typ B

167a) vgl. v. STACKELBERG, H., Grundlagen, S.35; KRELLE, W., Produktionstheorie, 2. Aufl., Tübingen 1969, S.28

168) MITSCHERLICH, E.A., Die Ertragsgesetze, Berlin 1948; s.a. LOCKE, W., Produktionsth., S.20ff

169) MITSCHERLICH, E.A., Ertragsgesetze, S.10

wobei x die Einsatzmenge eines Wachstumsfaktors, y die Höhe des Pflanzenertrages, A den unter günstigsten Bedingungen erreichbaren Höchstertrag und c einen Proportionalitätsfaktor darstellen. Vergleicht man Gl. (64) mit Gl. (42) oder besser mit Gl. (43), so ergeben sich bemerkenswerte Übereinstimmungen, die noch deutlicher hervortreten, wenn die Ertragsgesetze über sämtliche Einsatzfaktoren einander gegenübergestellt werden.

Pflanzenertrag y ¹⁷⁰⁾; Zuverlässigkeit $R(t)$ ¹⁷¹⁾:

$$y = A (1 - e^{-c_1 x_1}) (1 - e^{-c_2 x_2}) \dots (1 - e^{-c_n x_n})$$

$$R(t) = [1 - (1 - e^{-\lambda_1 t})^{x_1}] [1 - (1 - e^{-\lambda_2 t})^{x_2}] \dots [1 - (1 - e^{-\lambda_n t})^{x_n}]$$

Beiden Denkansätzen ist gemeinsam, daß der Ertrag in Relation gesetzt wird zu einem maximal möglichen Ertrag. Bei MITSCHERLICH ist dies A , in der Zuverlässigkeitstheorie ist dies der Wert 1,0. Die üblichen Überlegungen zu Produktionsfunktionen gehen davon aus, daß bei geeigneter Kombination der produktiven Faktoren der Ertrag prinzipiell bis ins Unendliche gesteigert werden kann. Gerade an dieser Prämisse könnte jedoch die Kritik ansetzen, da sie in dieser extremen Formulierung sicher nicht wirklichkeitskonform ist. Eine Produktionsfunktion mit breiterer Gültigkeit zu formulieren erscheint möglich, sofern es gelingt, weitere absolute Produktionsgrenzen aufzuspüren und an diesen Maximalerträgen die Ertragszuwächse zu messen.

170) MITSCHERLICH, E.A., Ertragsgesetze, S.11

171) s.nap. 5.1., Gl. 56

6. Ansätze zur Bildung eines Entscheidungsmodells für die Festlegung wirtschaftlich sinnvoller Systemzuverlässigkeiten

6.1. Wertgestaltung und organisatorische Voraussetzungen

Wie die vorangegangenen Kapitel gezeigt haben, ist Zuverlässigkeitszuwachs generell mit exponentiell steigenden Faktoreinsätzen resp. Kosten verbunden. Dieser Kostenkurve b in Abb.44 sind die in Geldeinheiten ausgedrückten, subjektiven Wertvorstellungen eines Systemverwenders gegenüberzustellen, die er mit den einzelnen Systemzuverlässigkeiten verbindet, Kurve a in Abb.44. Der typische Verlauf dieser Wertfunktion ist dadurch gekennzeichnet, daß unterhalb einer bestimmten Zuverlässigkeit der Systemwert negativ beurteilt wird. Oberhalb dieser Systemzuverlässigkeit steigt die Wertfunktion dann sehr rasch an und schwenkt danach allmählich auf eine konstante Wertbeurteilung ein. Eine darüber hinausgehende Zuverlässigkeitssteigerung schlägt sich nicht in einem Wertzuwachs nieder. Wird die Differenzkurve c der beiden Teilkurven a, b in Abb. 44 gebildet, so gibt deren Maximum das wirtschaftliche Zuverlässigkeitsoptimum R_{opt} an.¹⁷²⁾ Während sich, wie in Kap. 6.3. gezeigt werden kann, die Erfassung der Kostenkurve b wenigstens teilweise relativ einfach gestaltet, ist Hauptproblem dieser Optimierungsmethode, eine individuelle Wertkurve a zu ermitteln. Dem mit quantitativen Zuverlässigkeitsbetrachtungen nicht vertrauten Praktiker wird es nahezu unmöglich sein, eine solche Abhängigkeit anzugeben, da ihm jeder Orientierungspunkt fehlt. Er wird möglicherweise Neigung verspüren, absolute Zuverlässigkeit anzustreben, ein Anliegen, das, wie aus den vorangegangenen Überlegungen hervorgeht, mit unendlich hohen Kosten

¹⁷²⁾ s. MASING, W., Qualitätsplanung, S.90 ff

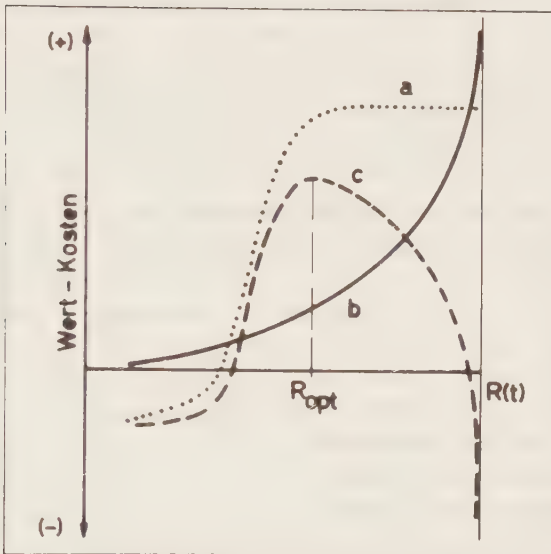


Abb.44: Bestimmung des Zuverlässigkeitsoptimums durch Wertgestaltung

verbunden ist. Notwendigerweise bedeutet daher die Festlegung von Zuverlässigkeitszielen, ein bewußt kalkulierbares Risiko eingehen zu müssen.

Um solche Entscheidungen treffen zu können, müssen von langer Hand Daten gesammelt werden, die den Komplex "Zuverlässigkeiten konkreter Systeme und ihre Bewertung (Kosten)" erhellen können. In diesem Zusammenhang stellt sich dann auch die Frage, die hier allerdings nicht näher erörtert werden kann, in welcher Form das betriebliche Rechnungswesen ausgestaltet sein sollte, damit Verluste durch mangelhafte Zuverlässigkeit immer richtig erfaßt und als solche erkennbar werden.

Da der gesamte theoretische Unterbau der Systemzuverlässigkeit vollkommen unabhängig vom äußeren Erscheinungsbild des Systems ist, er auf der anderen Seite recht intensive Spezialkenntnisse erfordert, wird verschiedent-

lich der Vorschlag gemacht, alle Zuverlässigkeitsaktivitäten innerhalb einer Unternehmung in einer dem Management als Stab zugeordneten Abteilung zu zentralisieren.¹⁷³⁾ Vor allem LLOYD-LIPOW vertreten diese Ansicht und legen für eine solche Abteilung einen ganzen Aktivitätenkatalog fest, der insbesondere folgende Aufgaben umfassen soll:

1. Zuverlässigkeitsbewertung im Sinne einer Cost-Effectiveness-Analyse (reliability evaluation and specification)¹⁷⁴⁾
2. Ableitung der erforderlichen Subsystemzuverlässigkeit aus der Gesamtsystemzuverlässigkeit (reliability apportionment). Dieser Punkt ist besonders wichtig, wenn in Lieferverträgen mit Subsystemunterlieferanten Zuverlässigkeitsstandards festgelegt werden sollen¹⁷⁵⁾. Eng verwandt ist hiermit:
3. Verkäuferbefragung (vendor control). Sie versucht die Wertvorstellungen über die Systemzuverlässigkeit bei potentiellen Käufern des Systems zu ermitteln.¹⁷⁶⁾
4. Sammlung von Zuverlässigkeitsdaten (reliability and failure reporting system).

173) LLOYD-LIPOW, Reliability, S.13 ff; OSANN, F., Commercial Rel., S.384: Im amerik. CHRYSLER-Konzern ist z.B. die Stelle eines "Corporate Vice President" vorgesehen, der ausschließlich für den Bereich Qualität und Zuverlässigkeit verantwortlich ist.

174) McCLOURE, J.Y., Organizing for Reliability and Quality Control, Chapt.: Cost-Effectiveness Considerations, in: IRESON, W.G., Handbook, S.16-7 ff; NEUNER, G.E.-MILLER, R.N., Effectiveness Evaluation Using Dynamic Programming, in: Proc. 1968 Annual Symp. on Rel., S.47 ff; WINLUND, E.S., Cost-Eff.; BARNES, B.P., System Cost-Effectiveness: An Application, in: Proc. 1968 Annual Symp. on Rel., S.38 ff

175) vgl. z.B. US Military Standards (MIL-STD), s. DOM+ BROWSKI, E., Normen und verwandte Unterlagen auf dem Zuverlässigkeitsgebiet, TZ 3 (1966) 8, S.66 ff

176) MAY, A.J., Improve Reliability Through Vendor Assurance, in: Proc. 1968 Annual Symp. on Rel., S.21 ff

6.2. Kostenverlauf als Entscheidungskriterium

Macht der Systemverwender seine Wertvorstellungen ausschließlich von Kostenüberlegungen abhängig, d.h. strebt er nach dem kostengünstigsten System, dann sind seine Präferenzen aus einer Kostensummenkurve ablesbar. Diese Summenkurve setzt sich zusammen aus den Funktionen verschiedener Kostenarten, die tendenziell unterschiedlich auf Systemzuverlässigkeitsänderungen reagieren. Als wichtigste sind zu nennen:

1. Beschaffungskosten (a)

Sieht man von der meist nicht gegebenen Möglichkeit der Verringerung der Zahl aktiver Elemente ab (Kap. 5.3.), dann ist das Erstellen eines Systems mit höherer Zuverlässigkeit wegen des Verlaufs der Ertragsgesetze zuverlässigkeitserhöhender Methoden mit exponentiell ansteigenden Beschaffungskosten verbunden.

2. Betriebskosten (b)

Hier hängt der Kostenverlauf weitgehend von der angewandten zuverlässigkeitserhöhenden Methode ab. Werden heiße oder warme Redundanzen eingesetzt, erhöht sich die Anzahl der zu betreibenden Elemente, mithin erhöhen sich auch die Betriebskosten. Bei den anderen Methoden kann eine solche generelle Aussage nicht gemacht werden. Im Falle einer Systemunterlastung wird auch mit relativ steigenden Betriebskosten zu rechnen sein, da Verbrauch und Belastung meist nicht in proportionalem Verhältnis stehen. Die übrigen zuverlässigkeitserhöhenden Methoden können sowohl zu einer Erhöhung wie einer Senkung der Betriebskosten führen.

3. Wartungskosten (c)

Wird die Zuverlässigkeit des Systems über vorbeugende Instandhaltung vergrößert, so steigen die Wartungskosten

mit jeder zusätzlich vorgenommenen Wartung linear an.

Diesen tendenziell mit wachsender Systemzuverlässigkeit steigenden Kostenarten stehen Kostenarten gegenüber, die mit wachsender Zuverlässigkeit fallen.

4. Ausfall-, Stillstands-, Wiederanlaufkosten (d)

Ausfall- und Wiederanlaufkosten fallen in fixer Höhe je Ausfallereignis an.¹⁷⁷⁾ Die Stillstandskosten des Systems verlaufen proportional zur Stillstandszeit.¹⁷⁸⁾ Mit wachsender Zuverlässigkeit, d.h. seltener auftretenden und kürzer andauernden Ausfallereignissen nehmen diese Kosten ab.

5. Reparaturkosten (e)

Da Reparaturen nur im Zusammenhang mit eingetretenen oder kurz bevorstehenden Ausfällen erforderlich werden, nehmen die Reparaturkosten mit steigender Zuverlässigkeit ab. In diesem Zusammenhang ist sogar eine Opportunitätskostenbetrachtung sinnvoll, da Reparaturen in der Regel besonders qualifiziertes Personal binden.

6. Ausfallfolgekosten (f)

Unter diesem Begriff sind eine große Zahl verschiedener Kostenarten einzuordnen, die in unmittelbarem wie mittelbarem Zusammenhang mit Systemausfällen stehen. Während in einigen Fällen, z.B. bei Garantieleistungen oder Konventionalstrafen, ihre Quantifizierung und Zuordnung keine Schwierigkeiten bereitet, entziehen sie sich oft einer antizipativen Bewertbarkeit, oder die Frage nach ihrer Kausalität kann nicht mehr sinnvoll beantwortet werden. Je nach Blickwinkel, z.B. betriebswirtschaftlichem oder

177) s. REDEKER, G., Methodenwahl, S.75 f, 80 f

178) ebenda, S.77 ff

volkswirtschaftlichem, wird der Kausalzusammenhang enger oder weiter zu fassen sein.

Grundsätzlich nehmen die Ausfallfolgekosten mit wachsender Zuverlässigkeit ab.

Werden die mit jeder Zuverlässigkeitsstrategie verbundenen Kosten auf einen gemeinsamen Zeitpunkt diskontiert und gegeneinander abgetragen, ergibt sich ein Verlauf entsprechend Abb. 45.

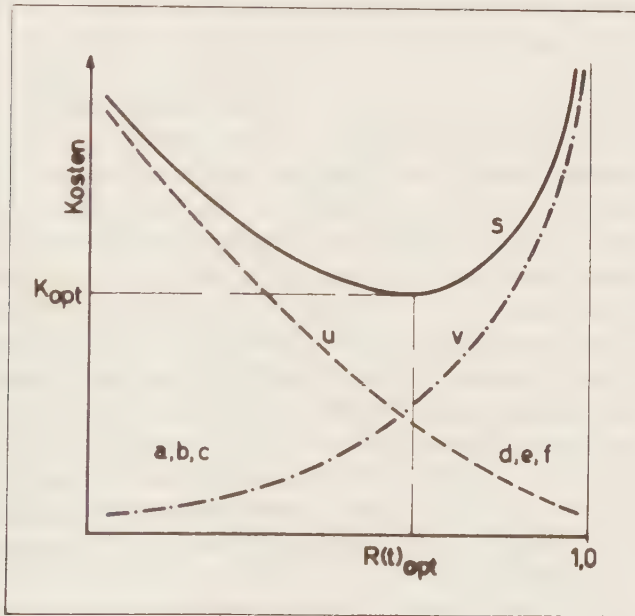


Abb.45: Kostensummenkurve¹⁷⁹⁾ zur Bestimmung des Zuverlässigkeitsoptimums

179) BALL-HILL, Introduction, S.2; ein vergleichbares Diagramm "Optimierung der Qualität der Mustertreue" bei LILIE, H. et al., Qualitätskontr., S.33

Welche Kostenarten tatsächlich in das Entscheidungskalkül einzubeziehen sind, hängt davon ab, in welchem Verhältnis der Entscheidungsträger zu dem System steht. Ist es aus seiner Sicht ein produzierendes System, wird er die Totalkostenstruktur betrachten. Ist es aus seiner Sicht ein produziertes System, das er vermarkten will, sind Ausfallkosten und Reparatur- und Ausfallkosten zunächst nur insoweit zu berücksichtigen, als er sich vertraglich über Konventionalstrafen und Garantieleistungen gebunden hat, darüberhinaus gehen diese Kosten nur als Werbeargument, d.h. entsprechend dem Kostendenken des Käufers, in das Entscheidungsmodell ein.

Sofern es gelingt, die beiden gegenläufigen Kostenkurven u , v in Abb.45 zu antizipieren, kann aus diesem Modell die kostenoptimale Zuverlässigkeitsstrategie ermittelt werden.

Ausgangspunkt der Überlegung ist, daß bereits die Kurven u , v optimale Unterpolitiken, d.h. optimale Kurvenverläufe aus einer Schar tendenziell gleichlaufender Kurven, repräsentieren. Da nämlich mehrere Zuverlässigkeitserhöhende Methoden angewandt werden können und außerdem herausgefunden werden muß, an welchen Elementen die Methoden am günstigsten angesetzt werden müssen, muß, bevor die optimale Zuverlässigkeit des Systems im Sinne von Abb.45 ermittelt werden kann, zunächst das optimale Methodenmix, das zu jedem Zuverlässigkeitswert gehört, bestimmt werden.

In welcher Weise das Zuverlässigkeitsinstrumentarium z.B. in Verbindung mit Grenzkosten- resp. Grenzertragsbetrachtungen zu Algorithmen führen kann, mit deren Hilfe kostenoptimale Systemkonstruktionen für eine gegebene Systemzuverlässigkeit entworfen werden können, sei beispielhaft an einem seriellen System mit heißer Elementeredundanz gezeigt.

6.3. Algorithmus zur Bestimmung der kostenoptimalen Gestaltung eines redundanten Systems

Zugrunde gelegt wird ein System bestehend aus n logisch in Reihe geschalteten Elementen i , dessen Zuverlässigkeit $R_o(t)$ mindestens auf den Wert $R_g(t)$ angehoben werden soll. Als zuverlässigkeitserhöhende Methode soll nur das Schalten von heißen Redundanzen betrachtet werden, um die jedes Element einzeln vermehrfacht werden kann. Gegeben seien außerdem die Elementekosten K_i und die zu jedem Element gehörige Zuverlässigkeit $R_i(t)$, entweder direkt oder in Form von Ausfallverteilung und Aktivitätsdauer des Systems. Gesucht ist die beschaffungskostenoptimale, redundante Elementeanordnung, die mit einer Systemzuverlässigkeit $R(t) \geq R_g(t)$ verbunden ist.

Diese Aufgabe kann als die Bildung einer vollständigen Sequenz optimaler Teilentscheidungen aufgefaßt werden.¹⁸⁰⁾ Sie baut also auf dem für dynamisches Programmieren typischen Ansatz - jede Unterpolitik einer optimalen Politik ist optimal - auf.

Hiernach kann man jedes Element i des Ausgangssystems mit der Zuverlässigkeit $R_o(t)$ probeweise um eine Einheit vermehrfachen und die jeweilige Erhöhung der Systemzuverlässigkeit ($R_j(t) - R_o(t)$) nach Gleichung (56) berechnen. Der Differenzenquotient gebildet aus ($R_j(t) - R_o(t)$) und der Erhöhung der Systemkosten, d.h. der Kosten K_i des redundanten Elementes, entspricht dem Durchschnittsertrag der auf dieser Systemzuverlässigkeitsstufe investierten Geldeinheit. Dem Element, dessen Vermehrfachung auf dieser Stufe den maximalen Durchschnittsertrag liefert, wird dann endgültig eine redundante Einheit zugeschaltet, Abb. 46, 47.

180) ähnliche Verfahren bei KETTELE, J.D., Least-Cost Allocations of Reliability Investment, OR 10 (1962), S.249 ff; SANDLER, G.H., System and Subsystem Reliability, in: MYERS-WONG-GORDY, Rel. Engineering, S.62 ff

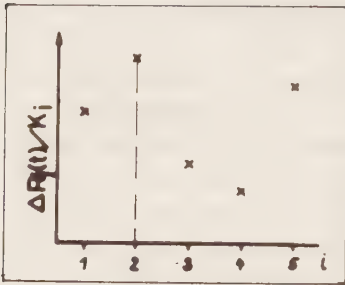


Abb.46

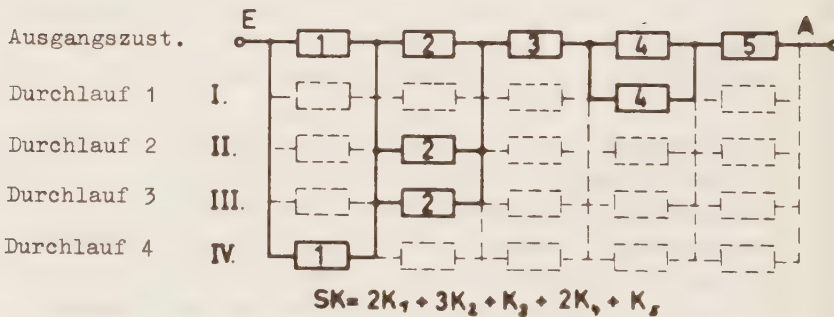
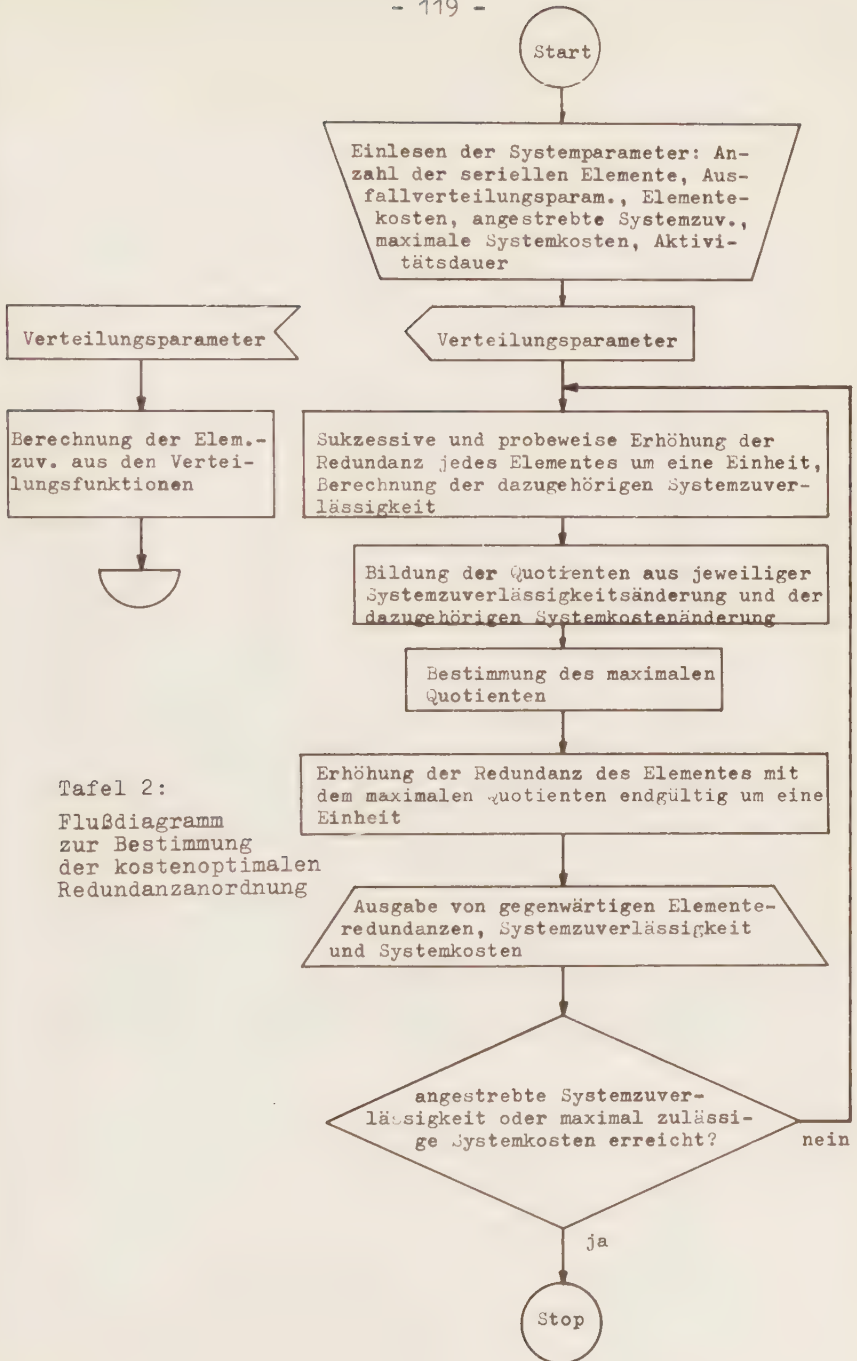


Abb.47

Dieser Prozeß, der dem Durchlaufen einer DO-Schleife entspricht, kann dann so oft wiederholt werden, bis $R_S(t)$ erreicht ist, wobei jedesmal das endgültig um eine redundante Einheit erhöhte System das Ausgangssystem des folgenden Durchlaufs ist. Auf diese Weise erhält man eine Sequenz von Systemkonstruktionen steigender Zuverlässigkeit zu minimalen Beschaffungskosten.

Die Tafeln 2 und 3 geben die praktische Formulierung eines derartigen Optimierungsalgorithmus als Flußdiagramm und in FORTRAN IV an. Tafel 4 zeigt die Ausdrücke der letzten vier Durchläufe vor Erreichen der angestrebten Systemzuverlässigkeit, während Tafel 5 die vollständige Sequenz Systembeschaffungskosten $SK = f(R(t))$ darstellt.



Tafel 2:
Flußdiagramm
zur Bestimmung
der kostenoptimalen
Redundanzanordnung

Tafel 3: FORTRAN IV - Programm zu Tafel 2

FORTRAN TR 4 (1) MV 13 MODE 3

```

C      BESTIMMUNG DER KOSTENOPTIMALEN ANORDNUNG HEISSER REDUNDANZEN
C
C      A(I) = KOSTEN / SYSTEMELEMENT (DM)
C      JVERT(I) = NR. DER AUSFALLVERTEILUNGSART (1 = EXPONENTIALVERT.,
C      2 = WEIBULLVERT., 3 = ELEMENTEZUV. GEGEBEN)
C      AMBAL(I) = LAMDA, ALPHA, ZUV. ODER BELIEBIGER PARAM. ELEM.I
C      SIGBET(I) = SIGMA, BETA, BEL. PARAM. ELEM.I
C      N = ANZAHL DER SERIELLEN SYSTEMELEMENTE (MAX.100)
C      M = SEQUENZLÄNGE (MAX.100)
C      ZUVGEG = ANGESTREBTE SYSTEMZUVERLÄSSIGKEIT
C      GND = GESAMTNUTZUNGSDAUER DES SYSTEMS
C      K(I) = REDUNDANZ VON ELEMENT(I)
C      ZUVOPT(P) = OPT. SYSTEMZUVERLÄSSIGKEIT
C      SK(P) = SYSTEMKOSTEN DER KONSTRUKTION P
C      SKMAX = MAXIMAL ZULÄSSIGE SYSTEMKOSTEN
C

```

```

DIMENSION A(100), JVERT(100), AMBAL(100), BETA(100), ZUV(100),
x K(100), ZUVOPT(100), SK(100)

READ (12,1000) N,M,SKMAX,ZUVGEG,GND
WRITE (1,1005) N,M,SKMAX,ZUVGEG,GND
1000 FORMAT(I10 / I10 / F20.2 / F20.8 / F20.10)
1005 FORMAT (1H1, 'N= ', I5, 5X, 'M= ', I5, 5X, 'SKMAX= ', F20.2, 5X,
x 'ZUVGEG = ', F10.8 // 'GND= ', F7.4 //)
DO 1010 I = 1,N
READ (12,1020)A(I), JVERT(I), AMBAL(I), BETA(I)
WRITE (1,1025)A(I), JVERT(I), AMBAL(I), BETA(I)
1010 FORMAT (F10.2, I5, 2F20.10)
1025 FORMAT (1H0, 'A= ', F10.2, 5X, 'JVERT= ', I5, 5X,
x 'AMBAL = ', F20.10, 5X, 'BETA = ', F20.10)

```

```

C
C BESTIMMUNG DER ELEMENTEZUVERLÄSSIGKEITEN AUS DEN AUSFALL-
C VERTEILUNGEN
DO 1Ø3Ø I = 1,N
CALL VERTIG (ZUV(I), AMBAL(I), BETA(I), JVERT(I), GND))
1Ø3Ø K(I) = 1
SK(1) = Ø.
ZUVOPT(1) = Ø.

C
INTEGER P, C
DO 1Ø8Ø P = 2,M
C = 1
IF (P.EQ. 2) C = Ø
BOPT = Ø.
DO 1Ø35 J = 1,N
K(J) = K(J) + C
ZU = 1.

```

```

DO 1040 I = 1,N
1040  ZU = ZU x (1.- ((1.- ZUV(I)) xx K(I)))
      B = (ZU- ZUOPT(P-1)) x 10.E5/ A(J)
1050  IF (B - BOPT) 1045, 1045, 1050
      BOPT = B
      ZUOPT(P) = ZU
      JOPT = J
      KOPT = K(J)
1045  K(J) = K(J) - C
1055  CONTINUE
      K(JOPT) = KOPT
      SK(P) = 0.

DO 1060 I = 1,N
1060  SK(P) = SK(P) + A(I) x FLOAT(K(I))
      WRITE (1,110) ZUOPT(P), SK(P), (I,A(I),K(I),ZUV(I), I = 1,N)
1110  FORMAT (1H0, 55X, 'ZUOPT = ', F10.8, 5X, 'SYSTEMKOSTEN = ',
x F10.2, 3H DM/(1X, 'ELEMENT', I4, 5X, F10.2, 'DM/STCK', 5X,
x 'REDUNDANZ = ', I4, 10 X, 'ZUVERL. = ', F10.8/)

```

IF (SKMAX .LE. SK(P) .OR. ZUVOPT(P) .GE. ZUVGEG) GOTO 1150

1080 CONTINUE

1150 STOP

END

C

SUBROUTINE VERTIG (Z,AMB,SIGB,I,G)

GOTO (1016, 1017, 1018), I

C EXPONENTIALVERTEILUNG

1016 X = AMB x G

Z = EXP (-X)

RETURN

C WEIBULLVERTEILUNG

1017 X = (1./ AMB) x G xx SIGB

Z = EXP (-X)

RETURN

1018 Z = AMB

RETURN

END

ZUVOPT = 0,40701361 SYSTEMKOSTEN = 35814,00 DM

ELEMENT	1	751.00 DM/STCK	REDUNDANZ=	4
ELEMENT	2	1000.00 DM/STCK	REDUNDANZ=	5
ELEMENT	3	2000.00 DM/STCK	REDUNDANZ=	2
ELEMENT	4	1570.00 DM/STCK	REDUNDANZ=	8
ELEMENT	5	1250.00 DM/STCK	REDUNDANZ=	9

ZUVOPT = 0,44028315 SYSTEMKOSTEN = 37814,00 DM

ELEMENT	1	751.00 DM/STCK	REDUNDANZ=	4
ELEMENT	2	1000.00 DM/STCK	REDUNDANZ=	5
ELEMENT	3	2000.00 DM/STCK	REDUNDANZ=	3
ELEMENT	4	1570.00 DM/STCK	REDUNDANZ=	8
ELEMENT	5	1250.00 DM/STCK	REDUNDANZ=	9

ZUVOPT = 0,46234025 SYSTEMKOSTEN = 39064,00 DM

ELEMENT	1	751.00 DM/STCK	REDUNDANZ=	4
ELEMENT	2	1000.00 DM/STCK	REDUNDANZ=	5
ELEMENT	3	2000.00 DM/STCK	REDUNDANZ=	3
ELEMENT	4	1570.00 DM/STCK	REDUNDANZ=	8
ELEMENT	5	1250.00 DM/STCK	REDUNDANZ=	10

ZUVOPT = 0,49077510 SYSTEMKOSTEN = 40634,00 DM

ELEMENT	1	751.00 DM/STCK	REDUNDANZ=	4
ELEMENT	2	1000.00 DM/STCK	REDUNDANZ=	5
ELEMENT	3	2000.00 DM/STCK	REDUNDANZ=	3
ELEMENT	4	1570.00 DM/STCK	REDUNDANZ=	9
ELEMENT	5	1250.00 DM/STCK	REDUNDANZ=	10

Tafel 4: Ergebnisausdruck der letzten 4 Durchläufe
(angestrebte Systemzuv. ZUVOPT = 0,48)

Tafel 5: vollständige Sequenz
SK = f (ZUVOPT)

System- kosten	System- zuv.
0.00E+00	x
6.57E+03	x
7.82E+03	x
8.57E+03	x
1.01E+04	x
1.11E+04	x
1.24E+04	x
1.40E+04	x
1.52E+04	x
1.62E+04	x
1.70E+04	x
1.90E+04	x
2.05E+04	x
2.18E+04	x
2.34E+04	x
2.46E+04	x
2.56E+04	x
2.72E+04	x
2.84E+04	x
2.92E+04	x
3.07E+04	x
3.20E+04	x
3.32E+04	x
3.40E+04	x
3.58E+04	x
3.78E+04	x
3.91E+04	x
4.06E+04	x

x

x

x

x

x

x

x

x

x

x

x

x

x

x

x

x

x

x

x

x

x

x

x

x

x

x

x

x

x

x

x

L i t e r a t u r v e r z e i c h n i s

- ABBOT, L., Quality and Competition, New York 1955
- ALBACH, H., Wirtschaftlichkeitsrechnung bei unsicheren Erwartungen, Köln-Opladen 1959
- ALBACH, H., Stand und Aufgabe der Betriebswirtschaftslehre heute, ZfbF 19 (1967), S.446ff
- ALEWELL, K.-BLEICHER, K.-HAHN, D., Anwendung des Systemkonzepts auf betriebswirtschaftliche Probleme, ZfO 40 (1971) 3, S.159ff
- ANGST, W.-WOHLER, V., Betriebssicherheit automatischer Steuerungssysteme, Berichtswerk der 5. INTERKAMA 1971, München-Wien 1972, S.379ff
- ASQ-Fachgruppe Qualitätskosten, Qualitätskosten, QZ 15 (1970) 10, S.221ff
- BAIR, B.L.-FOX, A., Economical Reliability Program Design, in: Proc. 1969 Annual Symp. on Rel., S.181ff
- BALFANZ, H.-P., Bestimmung von Ausfallraten und Ausfallarten mechanischer und elektrischer Bauteile mit der Fehlerbaummethode und der Ausfalleffektanalyse, QZ 17 (1972) 5, S.94ff (zit. "Bestimmung")
- BALL, L.W.-HILL, D.A., Introduction to Reliability Engineering, (zit. "Introduction"), in: MYERS-WONG-GORDY, Rel. Engineering, S.1ff
- BARLOW, R.E.-HUNTER, L.C., Reliability Analysis, OR 8 (1961), S.200ff
- BARLOW, R.E.-PROSCHAN, F., Mathematical Theory of Reliability, New York-London-Sydney 1965
- BARNES, B.P., System Cost-Effectiveness: An Application, in: Proc. 1968 Annual Symp. on Rel., S.38ff
- BAZOVSKY, J., Reliability Theory and Practice, 2.Aufl., Englewood Cliffs, N.J. 1962 (zit. "Reliability")
- BELLMAN, R.-DREYFUS, S., Dynamic Programming and the Reliability of Multicomponent Devices, OR 6 (1958) 2, S.200ff

- BELL Telephone Laboratories, Method of Inadvertent Launch Analysis, Safety Study, Sec.VII, Vol.1 Sept.1962
- BIRD,C.M.-NAPOLITANO,C.J., Customerizing Reliability Programs, in: Proc. 11th Nat. Symp. on Rel. 1965, S.419ff
- BORTFELDT,O., Methoden zur Analyse von redundanten Schaltungen mit heißer Reserve, TZ 2 (1965) 5, S.63ff (zit. "Methoden")
- BROUHA,L., Physiology in Industry, Oxford-London 1960
- BRÜCKNER,W., Maßskalen, Meßmethoden und Meßfehler im betrieblichen Rechnungswesen, Diss. Darmstadt 1969
- BRUNNER,R., Berechnete Zuverlässigkeit in der Organisation, WuB 99 (1966) 7, S.428
- BUCHNER,R., Zur Anwendung der Verfahren der dynamischen Programmierung und der Netzwerktechnik auf Fragen der optimalen Anlagenpolitik, ZfB 40 (1970) 9 S. 571 ff
- BÜRK,G., Statistische Gesetzmäßigkeiten von Ausfallzeiten und Arbeitsintervallen an Fertigungsmaschinen - eine Feldstudie, in: BUSSMANN-MERTENS, Operations Res., S.17ff
- BUSSMANN,K.F.-KRESS,H.-KUHN,M., Instandhaltungsstrategien als Mittel zur Senkung der Instandhaltungskosten und zur Steigerung der Kapazitätsausnutzung industrieller Fertigungsanlagen, in: BUSSMANN-MERTENS, Operations Res., S.31ff
- BUSSMANN,K.F.-MERTENS,P. (Hrsg.), Operations Research und Datenverarbeitung bei der Instandhaltungsplanung, Stuttgart 1968 (zit. "Operations Res.")
- CALABRO,S.R., Reliability Principles and Practice, New York 1962
- CERRUTI,C., Qualitätsdaten des verkauften Produktes - Informationsrückkopplung und -auswertung, QZ 16 (1971) 11, S.241
- CHAPANIS,A., Theory and Methods for Analysing Errors in Man-Machine Systems, in: SINAIKO, Papers, S.42ff
- CHMIELEWICZ,K., Grundlagen der industriellen Produktgestaltung, Berlin 1968, (zit. "Produktgest.")

- CHURCHMAN, C.W.-ACKOFF, R.L.-ARNOFF, E.L., Operations Research. Eine Einführung in die Unternehmensforschung, 4. Aufl., Wien-München 1968 (Übers. a.d. Englischen)
- COMPES, P.C., Wirtschaftliche Auswirkungen von Betriebsunfällen, Diss. Aachen 1963
- CONNOR, J.A., Reliability Prediction, in: MYERS-WONG-GORDY, Rel. Engineering, S.81ff
- CONSTANTINIDES, A., An Operations Research Approach to System Effectiveness, in: Proc. 1969 Annual Symp. on Rel., S.250ff
- COOPER, J.I., Human-initiated Failures and Malfunction Reporting, IRE Transactions on Human Factors in Electronics, vol. HFE 1, Sept. 1961 New York (IEEE Trans.), S.104ff
- CURTIN, K.M., A Monte Carlo Approach to Evaluate Multimoded System Reliability, OR 7 (1959), S.721ff
- DALY, T.A.-OCKERMAN, P.H., Commercial Reliability Programs - a good investment? in: Proc. 11th Nat. Symp. on Rel. 1965, S.385 ff
- DEIXLER, A., Zählende und messende Methoden für Zuverlässigkeitsangaben, TZ 4 (1967) 9, S.11ff (zit. "Zählende")
- DELLINGER, D.C., Selecting Reliability Test Plans, in: IRESON, Handbook, S.3-1ff
- DENBISHER, A., Qualimetrie als Wissenschaft von Erzeugnisqualitätsmessung und -schätzung, QZ 16 (1971) 1, S.5ff
- DIN - 40041 (Vornorm), Zuverlässigkeit elektrischer Bauelemente - Begriffe, Okt. 1967
- DIN - 40042 (Vornorm), Zuverlässigkeit elektrischer Geräte, Anlagen und Systeme - Begriffe, Juni 1970; entspr. NTG 3002 (Entwurf), Berlin 1968
- DIRKS, H., Die Personalbeurteilung, in: MAYER-HERWIG, Betriebspsych., S.614ff
- DOBBINS, S.-ADELSBERG, J., Computer Methods for Effectiveness Evaluation, in: Proc. 1967 Annual Symp. on Rel., S.540ff

- DOMBROWSKI, E., Normen und verwandte Unterlagen auf dem Zuverlässigkeitsgebiet, TZ 3 (1966) 8, S.66ff
- DOMBROWSKI, E., Einführung in die Zuverlässigkeit elektronischer Geräte und Systeme, Berlin 1970, (zit. "Einführung")
- DOSHAY, J., Predicting Design Adequacy for Mission Environment, in: Proc. 11th Nat. Symp. on Rel. 1965, S.1ff
- DOYON, L.R.-BERSSENBRUGGE, M.W., Solving Complex Reliability Models by Computer, in: Proc. 1968 Annual Symp. on Rel., S.431ff
- DÜLFER, E., Zielsysteme, Entscheidungsprozeß und Organisationsstruktur im kooperativen Vertriebsverbund - Eine Anwendung kybernetischer Betrachtungsweise, in: WEISSER, G.-v.ENGELHARDT, M.-WILHELM, W. (Hrsg.), Genossenschaften und Genossenschaftsforschung, Festschrift G.DRAHEIM, Göttingen 1968, S.170ff
- DÜLL, R., Praktische Durchführung von Zuverlässigkeitsprüfungen im Rahmen der Statistischen Qualitätskontrolle, QK 14 (1969) 3, S.34ff
- EAGLE, K.H., Fault Tree and Reliability Analysis Comparisons, in: Proc. 1969 Annual Symp. on Rel., S.12ff
- EDHOLM, O.G., Probleme der Arbeitswissenschaft - Eine Einführung in die Ergonomie - , München 1967 (Übers. a.d. Englischen)
- EIMSTAD, H.A., Reliability and Maintainability Technical and Cost Relationships, in: Proc. 1968 Annual Symp. on Rel., S.331ff
- ENRICK, N.L., Qualitätskontrolle im Industriebetrieb - Methoden und Anwendungen - , München 1961 (Übers. a.d. Englischen)
- ENRICK, N.L., Zuverlässigkeits- und Qualitätskontrolle - ein Werkzeug der modernen Produktionsleitung, TZ 3 (1964) 3, S.11ff (Übers. a.d. Englischen)
- ENRICK, N.L., Einfache statistische Verfahren der Zuverlässigkeitssicherung, TZ 3 (1966) 7, S.45ff (Übers. a.d. Englischen)
- ENRICK, N.L., Sicherung von Qualität und Zuverlässigkeit mit Hilfe der mathematischen Programmierung, TZ 4 (1967) 9, S.93ff (Übers. a.d. Englischen)

- ETZRODT, A., Technische Zuverlässigkeit - ein Überblick,
TZ 1 (1964) 1, S.11ff
- FEIGENBAUM, A., Qualitätsstrategie für eine Wirtschaft
mit Vollbeschäftigung, QZ 16 (1971) 8, S.169f
- FLICK, F.-K., Der Qualitätswettbewerb im marktwirtschaft-
lichen System, (Diss. Köln), Wiesbaden 1966
- FOGEL, L.J., Biotechnology: Concepts and Applications,
Englewood Cliffs, N.J. 1963 (Zit. "Biotechn.")
- deFREMERY, I.D.N., Qualität und Systemdenken, QZ 16 (1971)
1, S.2f
- FRENCH, J.R.P.-RAVEN, B., The Basis of Social Power, in:
CARTWRIGHT, D. (Hrsg.), Studies in Social Power,
Ann Arbor-Mich. 1959, S.150ff
- GILMAN, G., An Inquiry into the Nature and Use of Authority,
in: HAIRE, M. (Hrsg.), Organization Theory in Industrial
Practice, New York 1962, S.105ff
- GILMORE, D.B., Application of a "Monte Carlo" Method to the
Determination of Mean Time to Failure of Complex
Systems, in: Proc. 1968 Annual Symp. on Rel.,
S.391ff
- GILMORE, H.L.-SCHWARTZ, H.C., Integrated Product Testing
and Evaluation: A Systems Approach to Improve
Reliability and Quality, New York-London-Sydney
1969
- GNEDENKO, B.W.-BELJAJEW, J.K.-SOLOWJEW, A.D., Mathematische
Methoden der Zuverlässigkeitstheorie, Bd.I u. II,
Berlin 1968 (Übers. a.d. Russischen), (zit. "Zuver-
lässigkeitstheorie")
- GÖRKE, W., Zuverlässigkeitsprobleme elektronischer Schal-
tungen, Mannheim-Wien-Zürich 1969
- GOULD, E.B., Reliability Reporting and Analysis, in: MYERS-
WONG-GORDY, Rel. Engineering, S.292ff
- GRAF, O., Arbeitszeit und Arbeitspause (zit. "Arbeitszeit"),
in: MAYER-HERWIG, Betriebspsych., S.95ff
- GREENE, K.-CUNNINGHAM, T.J., Failure Mode, Effects, and
Critically Analysis, in: Proc. 1968 Annual Symp.
on Rel., S.374ff

- GROCHIA, E., Systemtheorie und Organisationstheorie, ZfB 40 (1970), S.1ff
- GROCHIA, E., Unternehmungsorganisation - Neue Ansätze und Konzeptionen - , Hamburg 1972 (zit. "Unternehmungs-org.")
- GROSS, H., Zuverlässigkeitsmanagement als Element der Systemführung, QZ 14 (1969) 11/12, S.146ff
- GUTENBERG, E., Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre - Die Produktion - , 18.Aufl., Berlin-Heidelberg-New York 1971 (zit. "Prod.")
- HAHN, D., Führung des Systems Unternehmung, ZfO 40 (1971) 3, S.161ff
- HARTMANN, B., Organisationssysteme der betriebswirtschaftlichen Elektronischen Datenverarbeitung, Freiburg 1971
- HARTMANN, W.L., Kybernetik, Grundlage moderner Sicherheitsanalysen, IO 38 (1969) 7, S.319ff (zit. "Kybernetik")
- HARTMANN, W.L., Zuverlässigkeit und Systemsicherheit, IO 39 (1970) 2, S.79ff (zit. "Zuverlässigkeit")
- HARTMANN, W.L., Die Unfallverhütung als industrielle Führungsaufgabe, IO 39 (1970) 4, S.162ff
- HARTMANN, W.L., Theoretische Überlegungen zur vorbeugenden Instandhaltung, IO 40 (1971) 5, S.197ff
- HAX, H., Entscheidung bei unsicheren Erwartungen, Köln-Opladen 1970
- HAX, H.-LAUX, H., Flexible Planung - Verfahrensregeln und Entscheidungsmodelle für die Planung bei Ungewissheit, ZfbF 24 (1972), S.318ff
- HECHT, H., Economic Formulation of Reliability Objectives, in: Proc. 1970 Annual West Coast Symp. on Rel., S.109ff
- HEINEN, E., Das Zielsystem der Unternehmung, Wiesbaden 1966
- HEINEN, E. (Hrsg.), Industriebetriebslehre - Entscheidungen im Industriebetrieb, Wiesbaden 1972
- HEINEN, E., Industriebetriebslehre als Entscheidungslehre, in: HEINEN, E., Industriebetriebslehre, S.24ff

- HEINZE, K., Die Zustandsanalyse, ein neues Verfahren für die Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen, TZ 3 (1966) 8, S.11ff
- HETTINGER, Th., Arbeitsphysiologische Meßmethoden, Berlin, o.J. (aus RKW-Reihe: Arbeitsphysiologie - Arbeitspsychologie)
- HETTINGER, Th., Angewandte Ergonomie, Frechen 1970
- HEVESH, A.H., Cost of Reliability Improvement, in: Proc. 1969 Annual Symp. on Rel., S.54ff
- HEYNE, J.B.-SANDLER, G.H., System and Subsystem Reliability, in: MYERS-WONG-GORDY, Rel. Engineering, S.39ff
- HILF, H.H., Arbeitswissenschaft, München 1957
- HOEDEMAEKER, R.-MOWLE, E.-GORDON, G.S., TIROS: A Case History in Reliability, in: Proc. 1968 Annual Symp. on Rel., S.315ff
- HOFMANN, W., Zuverlässigkeit von Meß-, Steuer-, Regel- und Sicherheitssystemen, München 1968
- HOLLIGER, H., Katastrophenanalyse, IO 40 (1971) 5, S.201ff
- HUMMITZSCH, P., Zuverlässigkeit von Systemen, 2.verb.Aufl., Berlin 1965 (Heft 28 der Reihe Automatisierungstechnik), (zit. "Zuverlässigkeit")
- HUNT, J.V., Reliability Management under Automation, in: Proc. 1968 Annual Symp. on Rel., S.15ff
- IRESON, W.G. (Hrsg.), Reliability Handbook, New York 1966, (zit. "Handbook")
- IRE Transactions on Human Factors in Electronics, vol. HFE 1, Sept. 1961 New York (IEEE Trans.)
- JACOB, H., Zur neueren Diskussion um das Ertragsgesetz, ZfhF 9 (1957), S.598ff (zit. "Diskussion")
- JACOB, H., Das Ertragsgesetz in der industriellen Produktion, ZfB 30 (1960), S.455ff
- JÄGER, A.O., Personalauslese, in: MAYER-HERWIG, Betriebspsych., S. 569ff
- JURAN, J.M.-SEDER, L.A.-GRYNA, F.M. (Hrsg.), Quality Control Handbook, 2.Aufl., New York-Toronto-London 1962

- JURAN, J.M., The Japanese Quality Control Circles: Questions and Answers, Qual (1967) 2, S.37ff
- KASPER, E.F., Verschleißgrad und Austauschrate als Hilfe bei Absatzprognosen, ZfbF 24 (1972), S.281ff
- KAUFMANN, A., Zuverlässigkeit in der Technik - Kurze Einführung in die mathematische Theorie, München-Wien 1970 (Übers. a.d. Französischen)
- KAWIATH, A., Theoretische Grundlagen der Qualitätspolitik, Wiesbaden 1969 (zit. "Qualitätspol.")
- KENNEDY, J. et al., Handbook of Human Engineering Data for Design Engineers, Medford 1952
- KETTELE, J.D., Least-Cost Allocations of Reliability Investment, OR 10 (1962), S.249ff
- KIEFER, F.P.-BISHOP, W.-CARTER, J.W., Man-Rating the GEMINI Launch Vehicle, in: Proc. 1967 Annual Symp. on Rel., S.260ff
- KIATT, S., Die ökonomische Bedeutung der Qualität von Verkehrsleistungen, Berlin 1965
- KLEINSTEUBER, W.-MÜLLER, B.-OESTERER, D., Kostenoptimaler Serviceabstand für ein System mit vorgegebener Zuverlässigkeit, TZ 1 (1964) 3, S.53ff
- KLIS, M., Überzeugung und Manipulation - Grundlagen einer Theorie betriebswirtschaftlicher Führungsstile, WIESBADEN 1970 (zit. "Überzeugung")
- KLIS, M., Machttheoretische Grundlagen moderner Führungsstile, ZfO 40 (1971) 1, S.5ff
- KNIGHT, L.J., The Aspects of a Reliability and Quality Assurance Program, in: IRESON, Handbook, S.17-2ff
- KOSIOL, E., Die Unternehmung als wirtschaftliches Aktionszentrum, Hamburg 1972
- KRELLE, W., Produktionstheorie, 2.Aufl., Tübingen 1969
- KUCHENBECKER, H., Grundzüge der Wirtschaftsstatistik, Herne-Berlin 1970
- KÜHNLEIN, H.-TRÖTSCH, E., Zwei Verfahren für detaillierte Zuverlässigkeitsanalysen von Flugzeugen mit Hilfe eines Rechners, AuPF 12 (1971) 1, S.27ff

- KUPSCH, P.U.-MARR, R., Personalwirtschaft, in: HEINEN, Industriebetriebslehre, S.445ff
- LEBRE, E.G., A Commercial Product Reliability Program, in: Proc. 11th Nat.Symp. on Rel. 1965, S.392ff
- LEHMANN, G., Praktische Arbeitsphysiologie, 2.Aufl., Stuttgart 1962 (zit. "Arbeitsphys.")
- LEININGER, A., Zur Bedeutung des Gesetzes über technische Arbeitsmittel (Maschinenschutzgesetz) QZ 17 (1972) 1, S.132f
- LEVIN, B.R.-USAROV, I.A., Einige Aspekte des Zuverlässigkeitsproblems in der Gegenwart, TZ 3 (1967) 7, S.11ff (Übers. a.d. Russischen)
- LILIE, H. et al., Qualitätskontrolle-Qualitätssicherung, Berlin 1966 (zit. "Qualitätskontrolle")
- LISOWSKY, A., Qualität und Betrieb, Stuttgart 1928
- LLOYD, J.-LIPOW, M., Reliability: Management, Methods, and Mathematics, Englewood Cliffs, N.J. 1962 (zit. "Reliability")
- LÜCKE, W., Produktions- und Kostentheorie, Würzburg-Wien 1969 (zit. "Produktionsth.")
- LUSSER, R., Die Unzuverlässigkeit komplizierter Geräte, Flugkörper 1 (1959) Nr.6
- MAG, W., Die quantitative Erfassung der Kommunikationsstruktur und ihre Bedeutung für die Gestaltung der Unternehmensorganisation, ZfbF 22 (1970), S.22ff
- MÄNNEL, W., Wirtschaftlichkeitsfragen der Anlagenunterhaltung, Wiesbaden 1968
- MASING, W., Zuverlässigkeit als wirtschaftliches Problem, TZ 1 (1964) 1, S.33ff
- MASING, W., Qualität, QZ 15 (1970) 1, S.21f
- MASING, W., Fehler, QZ 15 (1970) 3, S.66ff
- MASING, W., Qualitätsplanung, QZ 15 (1970) 4, S.90ff
- MAY, A.J., Improve Reliability Through Vendor Assurance, in: Proc. 1968 Annual Symp. on Rel., S.21ff

- MAYER, A.-HERWIG, B. (Hrsg.), Betriebspsychologie, Bd. 9 von Handbuch der Psychologie, (LERSCH, Ph.-SANDER, F.-THOMAE, H. (Hrsg.)), Göttingen 1961 (zit. "Betriebspsych.")
- McCLURE, I. Y., Organizing for Reliability and Quality Control, in: IRESON, Handbook, S. 16-2ff
- McCORMICK, E. J., Human Factors Engineering, 2. Aufl., New York-San Franc.-Toronto-London 1964 (zit. "Human Factors")
- MEISTER, D., Methods of Predicting Human Reliability in Man-Machine Systems, HF (1964), S. 621ff
- MEISTER, D., Human Factors in Reliability (zit. "Human Rel.") in: IRESON, Handbook, S. 12-2ff
- MEISTER, D.-RABIDEAU, G. F., Human Factors Evaluation in System Development, New York-London-Sydney 1965
- MELLEROWICZ, K., Betriebswirtschaftslehre der Industrie, Bd. II, 6. Aufl., Freiburg 1968
- MENGER, C., Grundsätze der Volkswirtschaftslehre, 2. Aufl., Wien-Leipzig 1923
- MESSERSCHMIDT-BÖLKOW-BLOHM (Hrsg.), Technische Zuverlässigkeit, Berlin-Heidelberg-New York 1971 (zit. "Tech. Zuv.")
- MIL-STD-105 D, QK 12 (1967) 1, S. 5ff (Übers. a.d. Englischen)
- MITSCHERLICH, E. A., Die Ertragsgesetze, Berlin 1948 (Deutsche Akademie der Wissenschaften Berlin, Vorträge und Schriften, Heft 31)
- MUFF, E., Bestimmung der technischen Zuverlässigkeit aus Umfragen, IO 39 (1970) 2, S. 77f
- MYERS, R. H.-WONG, K. L.-GORDY, H. M., Reliability Engineering for Electronic Systems, New York-London-Sydney 1964 (zit. "Rel. Engineering")
- MYERS, R. H., Reliability Definitions, in: MYERS-WONG-GORDY, Rel. Engineering, S. 325ff
- MYERS, R. H., Reliability Testing, in: MYERS-WONG-GORDY, Rel. Engineering, S. 175ff

- NARESKY, J.J., Zuverlässigkeit, in: Handbuch des Industrial Engineering, Ergänzungsband, Berlin-Köln-Frankfurt o.J., S.609ff (Übers. a.d. Englischen)
- NERBER, P.O., Warranty Cost Estimates for Avionic Subsystems, in: Proc. 1969 Annual Symp. on Rel., S.270ff
- NESSWETHA, W., Bioklimatische Wirkungen auf die Arbeit, in: MAYER-HERWIG, Betriebspsych., S.118ff
- v. NEUMANN, J., Probabilistic Logics and the Synthesis of Reliable Organisms from Unreliable Components, Automata Studies ed. by C.E. SHANNON-J. McCARTHY, Princeton 1956, S.43ff
- NEUNER, G.E.-MILLER, R.W., Effectiveness Evaluation Using Dynamic Programming, in: Proc. 1968 Annual Symp. on Rel., S.47 ff
- NIESCHLAG, R.-SCHMIDT, E.-HÜSCHGER, H., Marketing - Ein entscheidungstheoretischer Ansatz, 4. Aufl., Berlin 1971
- OESTERER, D., Optimale Ersatzstrategie für ein System aus reparierbaren Elementen bei vorgegebener Verfügbarkeit, Ufo 16 (1972) 2, S.31ff
- OPFERMANN, K., Kostenoptimale Zuverlässigkeit produktiver Systeme - Ein Beitrag zur Planung der Abwehr von Störungen des Betriebsprozesses, Wiesbaden 1968 (zit. "Kostenoptimale Zuv.")
- OSANN, F., Commercial Reliability - The CHRYSLER 5 and 50 Warranty (zit. "Comm. Rel."), in: Proc. 11th Nat. Symp. on Rel., 1965, S.380ff
- PARR, H.-WEBSTER, J.T., A Method for Discriminating between Failure Density Functions Used in Reliability Predictions, Techn 7 (1965) 1, S.1ff
- PATERSON, E.G.D., Zuverlässigkeit und Qualität, TZ 1 (1964) 2, S.11ff
- PEELER, F.C., Environmental Testing, in: MYERS-WONG-GORDY, Rel. Engineering, S.230ff
- PIERUSCHKA, E., Principles of Reliability, London 1963
- PISTORIUS, G., Voraussetzungen für die Einführung moderner Qualitätssicherungssysteme in Klein- und Mittelbetrieben - Ein Untersuchungsbericht, QK 13 (1968) 12, S.155ff

- POSPISCHIL, O., Beispiel der Zuverlässigkeitsanalyse eines einfachen Systems, TZ 2 (1965) 4, S.62ff
- Proceedings 1st National Symposium on Reliability and Quality Control, New York City 1954
- Proceedings 2nd National Symposium on Reliability and Quality Control, Washington 1956
- Proceedings 3rd National Symposium on Reliability and Quality Control, Washington 1957
- Proceedings 4th National Symposium on Reliability and Quality Control, Washington 1958
- Proceedings 5th National Symposium on Reliability and Quality Control, Philadelphia 1959
- Proceedings 6th National Symposium on Reliability and Quality Control, Washington 1960
- Proceedings 7th National Symposium on Reliability and Quality Control, Philadelphia 1961
- Proceedings 8th National Symposium on Reliability and Quality Control, Washington 1962
- Proceedings 9th National Symposium on Reliability and Quality Control, San Francisco 1963
- Proceedings 10th National Symposium on Reliability and Quality Control, Washington 1964
- Proceedings 1964 Symposium of the Quantification of Human Performance, Albuquerque 1964
- Proceedings 11th National Symposium on Reliability and Quality Control, Miami Beach 1965
- Proceedings 1966 Annual Symposium on Reliability, San Francisco 1966
- Proceedings 1967 Annual Symposium on Reliability, Washington 1967
- Proceedings 1968 Annual Symposium on Reliability, Boston 1968
- Proceedings 1969 Annual Symposium on Reliability, Chicago 1969
- Proceedings 1970 Annual West Coast Reliability Symposium (Expanding World of Reliability), Beverly Hills 1970

- PROSCHAN, R., Redundancy for Reliability Improvement, in: ZELEN, Theory, S.55ff
- RADC Reliability Notebook, RADC TR - 58 - 211, US Department of Commerce, Washington D.C., o.Jg.
- RELEKER, G., Technische und betriebswirtschaftliche Grundlagen für die Methodenwahl bei der Erhaltung betrieblicher Anlagen, Diss. TU Hannover 1969 (zit. "Methodenwahl")
- REDEKER, G., Schadensfolgekosten-Ermittlung als Planungsgrundlage für die vorbeugende Instandhaltung, IO 40 (1971) 5, S.211ff
- REGULINSKI, T.L.-ASKREN, W.B., Mathematical Modeling of Human Performance Reliability, in: Proc. 1969 Annual Symp. on Rel., S.5ff
- REHAHN, K., Fragen der Zuverlässigkeit elektronischer Geräte, NT 11 (1961) 9, S.396ff
- REHG, V., Reliability Management Simulation Exercise, in: Proc. 1969 Annual Symp. on Rel., S.68ff
- REITTERER, B.L., Consideration of Maintainability in Reliability Programs, in: IRESON, Handbook, S.11-2ff
- RIEGER, H., Der Güterbegriff in der Theorie des Qualitätswettbewerbs. Ein Beitrag zur Reduktion der subjektiven Qualität auf ihre psychologischen Grundlagen, Berlin 1962
- ROSENTHAL, S.T., Begin Reliability Program before Contract is Signed, in: Proc. 1970 West Coast Symp., S.77ff
- deRUDDER, B., Grundriss einer Meteorobiologie des Menschen, 3.Aufl., Berlin-Heidelberg-New York 1952
- RUSCH, E., Theorie und Praxis von Lebensdauerverteilungen Teil I TZ 1 (1964) 2, S.81 ff; Teil II TZ 1 (1964) 3, S.63ff
- SANDLER, G.H., System Reliability Engineering, Englewood Cliffs, N.J. 1963 (zit. "System")
- SHELLEY, B.F., Maintenance Manhour Distributions - A Case Study - in: Proc. 1967 Annual Symp. on Rel., S.704ff
- SHERSHIN, A.C., Mathematical Optimization Techniques for the Simultaneous Apportionments of Reliability and Maintainability, OR 18 (1970) 1, S.95ff

- SINAIKO, H.W. (Hrsg.), Selected Papers on Human Factors in the Design and Use of Control Systems, New York 1961 (zit. "Papers")
- SINAIKO, H.W.-BUCKLEY, E.P., Human Factors in the Design of Systems, in: SINAIKO, Papers, S.1ff
- SMIRNOW, N.W., Mathematische Statistik in der Technik, Berlin 1969, Deutscher Verlag der Wiss., (Übers. a.d. Russischen)
- SMITH, C.S., Exakte Methoden der Qualitätskontrolle und Zuverlässigkeitsprüfung, München 1970 (Übers. a.d. Englischen)
- SPIEGELHALTER, F.-SCHNABEL, F., Die Struktur der Krankenstandes in der Industrie, Arbeitgeber, 14 (1962) S.302ff
- v.STACKELBERG, H., Grundlagen der theoretischen Volkswirtschaftslehre, 2.Aufl., Tübingen 1951 (zit. "Grundlagen")
- STEGEMANN, J., Leistungsphysiologie - Physiologische Grundlagen der Arbeit und des Sports, Stuttgart 1971 (zit. "Leistungsphys.")
- STÖRMER, H., Mathematische Theorie der Zuverlässigkeit, München 1970
- STRAUCH, H., Dynamische Qualitätsverbesserung - Ein Weg zur langfristigen Kostensenkung, Baden-Baden - Bad Homburg 1969 (zit. "Qualitätsverb.")
- STÜCKMANN, G., Der Berufserfolg als Motivationsphänomen, Berlin 1968
- SUMERLIN, W.T., Winning Reliability Management Techniques - Vintage 1966, in: Proc. 1967 Annual Symp. on Rel., S.104ff
- SCHALTEGGER, P., Mathematische Zuverlässigkeitstheorie, IO 39 (1970) 2, S.73ff
- SCHIEMENZ, B., Die mathematische Systemtheorie als Hilfe bei der Bildung betriebswirtschaftlicher Modelle, ZfB 40 (1970) S.769ff (zit. "Mathematische Syst.")
- SCHIEMENZ, B., Die Anwendbarkeit der Regelungstheorie zur Gestaltung betrieblicher Entscheidungsprozesse - Ein Beitrag zur Betriebskybernetik -, Diss. Darmstadt 1971 (zit. "Regelungstheorie")
- SCHILLING, H., Verschärfte Produzentenhaftung, QZ 17 (1972) 7, S.130f

- SCHMID, R.O., Einige einfache Hilfsmittel bei Zuverlässigkeitsüberlegungen, TZ 2 (1965) 6, S.89ff, (zit. "Hilfsmittel")
- SCHNEIDER, E., Einführung in die Wirtschaftstheorie, Bd. II, 12. Aufl., Tübingen 1969
- SCHNITZER, W.-SCHÜRGER, U.-SCHWEIZER, G., Die Verwirklichung von Flugregelungssystemen hoher Zuverlässigkeit durch Mehrfachanordnung, TZ 2 (1965) 6, S.53ff (zit. "Flugregelungssyst.")
- SCHRÖER, H.-O., Sicherheit als Gegenstand der Unternehmenspolitik, Tübingen 1969 (zit. "Sicherheit")
- SCHUMANN, J., Grundzüge der mikroökonomischen Theorie, Berlin-Heidelberg-New York 1971
- SCHÜRGER, K.-SCHWEIZER, G., Zuverlässigkeit und anthropotechnische Gesichtspunkte, LR 13 (1967) S.175ff
- TAYLOR, E.F., Reliability: What happens if ... ? in: Proc. 1969 Annual Symp. on Rel., S.62ff
- THEILE, U., Zuverlässigkeitsprobleme beim Zusammenwirken von Mensch und Maschine in modernen technischen Systemen, TZ 4 (1967) 10, S.18ff
- THOMANEK, F.R., Wer kann Qualitätssicherung in der Produktionsplanung betreiben? QZ 16 (1971) 4, S.75ff
- THORNDIKE, R.L., Personnel Selection, New York 1949
- TREBECK, R., Die Arbeitsanalyse als Grundlage der Arbeitsgestaltung, der Auswahl und Ausbildung von Mitarbeitern und der Arbeitsbewertung, in: MAYER-HERWIG, Betriebspsych., S.201ff
- TRETER, J., Die Zuverlässigkeit nachrichtentechnischer Geräte, Teil I TZ 2 (1965) 4, S.11ff; Teil II TZ 2 (1965) 5, S.45ff
- UHLMANN, W., Statistische Qualitätskontrolle - Eine Einführung - Stuttgart 1966
- ULICH, E., Periodische Einflüsse auf die Arbeit (zit. "Einflüsse") in: MAYER-HERWIG, Betriebspsych., S. 125ff
- ULICH, E., Unfallursachenforschung, in: MAYER-HERWIG, Betriebspsych., S.276ff

- ULRICH, H., Die Unternehmung als produktives soziales System, 2. Aufl., Bern-Stuttgart 1970 (zit. "Unternehmung")
- VDI-Richtlinie 4002 Blatt 1 (Entwurf), Erläuterungen zum Problem der Zuverlässigkeit technischer Erzeugnisse und/oder Systeme, März 1972
- VDI-Richtlinie 4003, Blatt 1 (Entwurf), Zuverlässigkeitsprogrammklassen, März 1972
- VIRENE, E.P., Reliability Growth and its Upper Limit, (zit. "Rel. Growth"), in: Proc. 1968 Annual Symp. on Rel., S.265ff
- WEBSTER, L.R., Choosing Optimum system Configurations, in: Proc. 10th Nat. Symp. on Rel. 1964, S.345ff
- WEBSTER, L.R., Optimum Redundancy for a Satellite Power System, in: Proc. 11th Nat. Symp. on Rel. 1965, S.568ff
- WEBSTER, L.R., Optimum System Reliability an Cost Effectiveness, in: Proc. 1967 Annual Symp. on Rel., S.489ff
- WEGNER, G., Systemanalyse und Sachmitteleinsatz in der Betriebsorganisation, Wiesbaden 1969
- WEIHER, H., Zuverlässigkeit nachrichtentechnischer Einrichtungen unter dem Gesichtspunkt der Ökonomie, NT 16 (1966) 2, S.46ff
- WEISBERG, S.A.-SCHMIDT, J.H., Computer Technique for Estimating System Reliability, in: Proc. 1966 Annual Symp. on Rel., S.87ff
- WEISS, G.H., A Survey of some Mathematical Models in the Theory of Reliability, in: ZELEN, Theory, S.3ff
- WENZEL, H., Zuverlässigkeit als Parameter bei Luft- und Raumfahrtprojekten, TZ 1 (1964) 1, S.77ff
- WENZEL, H.G., Klimatische Arbeitsbedingungen (zit. "Klimat.") in: MAYER-MERWIG, Betriebspsych., S.139ff
- WIENER, N., Mensch und Menschmaschine, Frankfurt-Bonn 1966, (zit. "Mensch") (Übers. a.d. Englischen)
- WILD, J., Input-, Output- und Prozeßanalyse von Informationssystemen, ZfbF 22 (1970), S.50ff

- WILLIAMS, H.L., Reliability Evaluation of the Human Component in Man-Machine Systems, EM (1958) 2, S.78ff
- WILLRETT, H., Erhöhung der Zuverlässigkeit eines Systems durch Verdoppelung und Unterteilung, TZ 1 (1964) 2, S.44ff (zit. "Erhöhung")
- WINLUND, E.S., Cost-Effectiveness Analysis for Optimal Reliability and Maintainability (zit. "Cost Eff.") in: Proc. 11th Nat.Symp. on Rel. 1965, S.107ff
- WIRZ, W., Zur Logik des Qualitätsbegriffes, Jahrbuch für Nationalök. und Stat., Bd. 104, 1915, Teil I, S.1ff
- WITTENBERG, U.H., Zur Frage des Zuverlässigkeitsgrades von Maschinen, Ufo 8 (1964) S.80 ff
- WOLFF, M., Optimale Instandhaltungspolitiken in einfachen Systemen, Berlin-Heidelberg-New York 1970
- WONG, K.L., Reliability Mathematics (zit. "Rel. Math."), in: MYERS-WONG-GORDY, Rel. Engineering, S.8ff
- WOODSON, W.E., Human Engineering Guide for Equipment Designers, Berkeley 1954
- WYLIE, J.E., The Optimization of Systems Reliability, in: Proc. 1966 Annual Symp. on Rel., S.719ff
- ZEEP, W., Redundanz - ein Mittel zur Steigerung der Zuverlässigkeit von technischen Systemen (zit. "Redundanz"), in: BUSSMAN-MERTENS, Operations Res., S.83ff
- ZELEN, M. (Hrsg.), Statistical Theory of Reliability (zit. "Theory"), Madison 1963
- ZORGER, P.H., Reliability Estimation, in: IRESON, Handbook, S.5-1ff

Z e i t s c h r i f t e n

- Ablauf und Planungsforschung (AuPF), Erscheinen mit Heft (1971) 1 eingestellt, (Ersch.Ort München)
- Der Arbeitgeber (Arb), (Ersch.Ort Düsseldorf)
- Die Betriebskrankenkasse, (Ersch.Ort Essen)
- Electrical Manufacturing (EM), seit Heft (1960) 4
Electro-technology, (Ersch.Ort New York)

- Flugkörper (Ersch.Ort Wiesbaden)
- Human Factors (HF), (Ersch.Ort New York)
- Industrielle Organisation (IO), (Ersch.Ort Zürich)
- Luftfahrttechnik - Raumfahrttechnik (LR), (Ersch.Ort
Düsseldorf)
- Nachrichtentechnik (NT), (Ersch.Ort Berlin)
- Operations Research (OR), (Ersch.Ort Baltimore)
- Qualität und Zuverlässigkeit (QZ), bis Heft 14 (1969)
6 Qualitätskontrolle (QK), (Ersch.Ort Freiburg)
- Quality - EOQC Bulletin (Qual), (Ersch.Ort Rotterdam)
- Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche
Forschung (ZfbF), bis Jg. 15 (1963) Zeitschrift
für handelswissenschaftliche Forschung - Neue
Folge (ZfhF), (Ersch.Ort Köln)
- Technische Zuverlässigkeit in Einzeldarstellungen (TZ),
(Erscheinen mit Heft (1967) 1 eingestellt) (Ersch.
Ort München)
- Technometrics (Techn), (Ersch.Ort Washington)
- Unternehmensforschung (Ufo), Zeitschrift für Operations
Research (Ersch.Ort Würzburg)
- Werkstatt und Betrieb (WuB), (Ersch.Ort München)
- Zeitschrift für Betriebswirtschaft (ZfB), (Ersch.Ort
Wiesbaden)
- Zeitschrift für Organisation (ZfO), (Ersch.Ort Frank-
furt)

Lebenslauf

1. 6. 1943 geboren in Leslau/Weichsel als Sohn des Vorsitzenden Richters Dr.Theo Schellmann und seiner Ehefrau Traute geb.Holzappel
- 1949 - 1953 Volksschulbesuch in Eschwege/Werra und Hanau/Main
- 1955 - 1962 Besuch des Gymnasiums Hohe Landesschule in Hanau
22. 2. 1962 Abitur
- 1962 - 1968 Studium des allgemeinen Maschinenbaus an der Technischen Hochschule Darmstadt
7. 11. 1968 Abschluß des Maschinenbaustudiums mit dem Grad eines Diplomingenieurs
- 1969 - 1973 Immatrikulation an der Rechts- und Staatswissenschaftlichen Fakultät der Universität Marburg
Juristisches Grundstudium und Studium der Volkswirtschaftslehre mit besonderem Schwerpunkt Betriebswirtschaftslehre
- seit 25.5.73 verheiratet mit der Gerichtsreferendarin Birte Schellmann geb. Schmidt
- seit 1.8.73 Projektleiter bei der Klöckner-Werke AG, Duisburg

